

Humboldt-Universität zu Berlin

## **DISSERTATION**

### **Auswirkungen verschiedener Bodennutzungssysteme auf ausgewählte physiko-chemische Bodeneigenschaften und pflanzenbauliche Parameter in Berlin-Dahlem und Dedelow**

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor rerum agriculturalarum (Dr. rer. agr.)

eingereicht an der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät

Dipl.-Ing. agr. M. Reşat Sümer

Dekan: Prof. Dr. Dr. h. c. Frank Ellmer

Gutachter/in:     1. Prof. Dr. J. Zeitz  
                          2. Prof. Dr. F. Ellmer  
                          3. Dr. G. Verch

Datum der Einreichung:   01.06.2012

Datum der Promotion:     25.10.2012

Meinen lieben Eltern

Sevgili Anneciğime ve Babacığma

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Stand des Wissens.....</b>	<b>2</b>
2.1 Bodenschutz und nachhaltige Landnutzung .....	2
2.2 Einfluss der Bodenbearbeitung und der Standortfaktoren auf bodenphysikochemische und pflanzenbauliche Parameter .....	5
2.2.1 Bodenstruktur und Bodenverdichtung.....	10
2.2.2 Wasserhaushalt .....	13
2.3 Bedeutung der organischen Substanz.....	14
<b>3. Material und Methoden .....</b>	<b>16</b>
3.1 Standortbeschreibung .....	16
3.1.1 Berlin-Dahlem .....	16
3.1.2 Dedelow .....	22
3.2 Feldversuche.....	25
3.2.1 Berlin-Dahlem .....	25
3.2.2 Dedelow .....	27
3.3 Untersuchungsparameter .....	28
3.4 Auswertungsmethoden.....	39
<b>4. Ergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>40</b>
4.1 Standortparameter .....	40
4.1.1 Substratschichtung.....	40
4.1.2 Bodenarten.....	44
4.2 Bodenphysikalische Eigenschaften .....	44
4.2.1 Durchdringungswiderstand.....	44
4.2.2 Aggregatstabilität.....	49
4.2.3 Wasserretention und ungesättigte Wasserleitfähigkeit.....	51
4.3 Diskussion zu bodenphysikalischen Merkmalen .....	71

4.4	Bodenchemische Eigenschaften .....	76
4.4.1	pH-Wert.....	76
4.4.2	Gesamtkohlenstoff und heißwasserlöslicher Kohlenstoff .....	77
4.4.3	Gesamtstickstoff und heißwasserlöslicher Stickstoff.....	82
4.4.4	C/N-Verhältnis.....	86
4.4.5	Kationenaustauschkapazität.....	89
4.5	Diskussion zu bodenchemischen Merkmalen .....	92
4.6	Pflanzenbauliche Ergebnisse .....	97
4.6.1	Ertrag von Hafer .....	97
4.6.2	Ertragsstruktur von Hafer .....	98
4.6.3	Qualität von Hafer .....	100
4.6.4	Ertrag von Winterweizen .....	105
4.6.5	Ertragsstruktur von Winterweizen .....	108
4.6.6	Qualität von Winterweizen .....	110
4.6.7	Ertrag von Körnermais.....	118
4.7	Diskussion zu pflanzenbaulichen Ergebnissen .....	119
<b>5.</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>127</b>
<b>6.</b>	<b>Summary.....</b>	<b>131</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>134</b>
	<b>Danksagung.....</b>	<b>145</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>147</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Standort Berlin-Dahlem der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät mit Versuchsflächen	16
Abb. 2: Bodenprofil am Standort Berlin–Dahlem, Braunerde-Fahlerde aus Kryoturbatlehmsand über Fließlehm über tiefem Moränencarbonatsandlehm mit der Horizontfolge Ap/Ael/Ael+Bt/Bt/elCv des Lehr-Bodenprofils Berlin-Dahlem	17
Abb. 3: Witterungsverlauf 2006 (Niederschlag und Temperatur im Vergleich zum langjährigen Mittel 1971 - 2000)	20
Abb. 4: Witterungsverlauf 2007 (Niederschlag und Temperatur im Vergleich zum langjährigen Mittel 1971 - 2000)	20
Abb. 5: Lage des Standortes Dedelow	22
Abb. 6: Luftbild des Standortes Dedelow	23
Abb. 7: Witterungsverlauf 2007 (Niederschlag und Temperatur im Vergleich zum langjährigen Mittel 1985 - 2000)	24
Abb. 8: Versuchsdesign am Standort Berlin-Dahlem, DIII, mit: FW = Fruchtfolgegewechsel; GF = Getreidefolge	26
Abb. 9: Versuchsdesign V751/5 am Standort Dedelow	28
Abb. 10: pF – K <sub>u</sub> Apparatur DT 04-01 der Firma UGT	38
Abb. 11: Darstellung des Substratwechsels in Berlin-Dahlem	41
Abb. 12: Darstellung des Substratwechsels in flach (oben) und tief (unten) bearbeiteten Parzellen in Berlin-Dahlem	42
Abb. 13: Darstellung der Substratschichtung in der Versuchsanlage V751/5 in Dedelow	43
Abb. 14: Einfluss von verschiedenen Bodenbearbeitungstiefen auf den Durchdringungswiderstand in den optimal mit Kalk und Stallmist versorgten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, Frühjahr 2006)	46

Abb. 15: Einfluss von Kalk- und Stallmistdüngung auf den Durchdringungswiderstand bei flacher Bodenbearbeitung (Berlin-Dahlem, Frühjahr 2006)	47
Abb. 16: Einfluss von Kalk- und Stallmistdüngung auf den Durchdringungswiderstand bei tiefer Bodenbearbeitung (Berlin-Dahlem, Frühjahr 2006)	48
Abb. 17: Einfluss verschiedener Bodenbearbeitungsvarianten auf den Durchdringungswiderstand im Feldversuch V751/5 in Dedelow (Frühjahr 2007)	49
Abb. 18: Wasserretentionsfunktionen bei minimalem (links) und maximalem (rechts) C <sub>org</sub> -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei flacher Bodenbearbeitung (17 cm), Berlin-Dahlem (2006)	58
Abb. 19: Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Saugspannungen bei minimalem (links) und maximalem (rechts) C <sub>org</sub> -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei flacher Bodenbearbeitung (17 cm), Berlin-Dahlem (2006)	59
Abb. 20: Wasserretentionsfunktionen bei minimalem (links) und maximalem (rechts) C <sub>org</sub> -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei tiefer Bodenbearbeitung (28 cm), Berlin-Dahlem (2006)	60
Abb. 21: Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Saugspannungen bei minimalem (links) und maximalem (rechts) C <sub>org</sub> -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei tiefer Bodenbearbeitung (28 cm), Berlin-Dahlem (2006)	61
Abb. 22: Wasserretentionsfunktionen bei minimalem (links) und maximalem (rechts) C <sub>org</sub> -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Direktsaat am Standort Dedelow (2007)	62
Abb. 23: Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Saugspannung bei minimalem (links) und maximalem (rechts) C <sub>org</sub> -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Direktsaat am Standort Dedelow (2007)	63
Abb. 24: Wasserretentionsfunktionen bei minimalem (links) und maximalem (rechts) C <sub>org</sub> -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Grubber (10 cm) am Standort Dedelow (2007)	64

Abb. 25: Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Saugspannung bei minimalem (links) und maximalem (rechts) $C_{org}$ -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Grubber (10 cm) am Standort Dedelow (2007)	64
Abb. 26: Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt (Wasserspannungskurve, pF-Kurve) bei einem Sandboden, einem tonigen Schluffboden (Lössboden) und einem Tonboden (A-Horizonte)	65
Abb. 27: Die Abhängigkeit der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit vom Wassergehalt	65
Abb. 28: Wasserretentionsfunktionen bei minimalem (links) und maximalem (rechts) $C_{org}$ -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Grubber (15 cm) am Standort Dedelow (2007)	66
Abb. 29: Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Saugspannung bei minimalem (links) und maximalem (rechts) $C_{org}$ -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Grubber (15 cm) am Standort Dedelow (2007)	67
Abb. 30: Wasserretentionsfunktionen bei minimalem (links) und maximalem (rechts) $C_{org}$ -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Pflug (15 cm) am Standort Dedelow (2007)	68
Abb. 31: Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Saugspannung bei minimalem (links) und maximalem (rechts) $C_{org}$ -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Pflug (15 cm) am Standort Dedelow (2007)	69
Abb. 32: Wasserretentionsfunktionen bei minimalem (links) und maximalem (rechts) $C_{org}$ -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Pflug (25 cm) am Standort Dedelow (2007)	69
Abb. 33: Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Saugspannung bei minimalem (links) und maximalem (rechts) $C_{org}$ -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Pflug (25 cm) am Standort Dedelow (2007)	70
Abb. 34: Darstellung der $KAK_{eff}$ , $KAK_{pot}$ , Corg- und Tongehalte in flacher und tiefer Bodenbearbeitung in 10 - 15 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem; 2006)	90
Abb. 35: Darstellung der $KAK_{eff}$ , $KAK_{pot}$ , Corg- und Tongehalte in flacher und tiefer Bodenbearbeitung in 20 - 25 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem; 2006)	90

Abb. 36: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung < 2,0 mm von Hafer (2006)	101
Abb. 37: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung 2,0 – 2,2 mm von Hafer (2006)	101
Abb. 38: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung 2,2 – 2,5 mm von Hafer (2006)	102
Abb. 39: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung 2,5 – 2,8 mm von Hafer (2006)	102
Abb. 40: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung 2,8 – 3,0 mm von Hafer (2006)	103
Abb. 41: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung > 3,00 mm von Hafer (2006)	103
Abb. 42: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung < 2,0 mm von Winterweizen (2007)	111
Abb. 43: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung 2,0 - 2,2 mm von Winterweizen (2007)	112
Abb. 44: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung 2,2 - 2,5 mm von Winterweizen (2007)	112
Abb. 45: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung 2,5 – 2,8 mm von Winterweizen (2007)	113
Abb. 46: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung 2,8 - 3,0 mm von Winterweizen (2007)	114
Abb. 47: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung > 3,0 mm von Winterweizen (2007)	115



## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Bodenprofil in Berlin-Dahlem: Profilbeschreibung	18
Tab. 2: Textur und ausgewählte bodenchemische Parameter am Standort Berlin-Dahlem	19
Tab. 3: Textur und ausgewählte bodenphysikalische Parameter am Standort Berlin-Dahlem	19
Tab. 4: Ausgewählte bodenphysikalische Parameter zum Standort Dedelow	23
Tab. 5: Ausgewählte Bodenchemische Parameter zum Standort Dedelow	23
Tab. 6: Genutzte Prüffaktoren und Faktorstufen am Standort Berlin-Dahlem	25
Tab. 7: Mineralische und organische Düngung ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) am Standort Berlin-Dahlem	26
Tab. 8: Genutzte Prüfglieder und Bezeichnungen am Standort Dedelow	27
Tab. 9: Untersuchte Boden- und Pflanzenkennwerte an den beiden Versuchsstandorten Berlin-Dahlem und Dedelow	30
Tab. 10: Extreme der Decksandmächtigkeiten in der Versuchsanlage DIII in Berlin-Dahlem	43
Tab. 11: Aggregatstabilität (%) in 10 - 15 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)	50
Tab. 12: Aggregatstabilität (%) in 20 - 25 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)	50
Tab. 13: Aggregatstabilität (%) in verschiedenen Bodentiefen der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten (Dedelow, 2007)	51
Tab. 14: Gemessene und angepasste Wassergehaltswerte (Vol.-%) in Abhängigkeit der ausgewählten $C_{\text{org}}$ -Gehalt (%) – Parzellen in 10 - 15 cm Bodentiefe der untersuchten Prüfglieder (Berlin-Dahlem, 2006)	53
Tab. 15: Gemessene und angepasste Wassergehaltswerte (Vol.-%) in Abhängigkeit der ausgewählten $C_{\text{org}}$ -Gehalt (%) – Parzellen in 20 - 25 cm Bodentiefe der untersuchten Prüfglieder (Berlin-Dahlem, 2006)	54

Tab. 16: Gemessene und angepasste Wassergehaltswerte (Volumen-%) in Abhängigkeit der ausgewählten $C_{org}$ -Gehalt (%) – Parzellen in 10 - 15 cm Bodentiefe der untersuchten Varianten (Dedelow, 2007)	56
Tab. 17: Gemessene und angepasste Wassergehaltswerte (Volumen-%) in Abhängigkeit der ausgewählten $C_{org}$ -Gehalt (%) – Parzellen in 20 - 25 cm Bodentiefe der untersuchten Varianten (Dedelow, 2007)	57
Tab. 18: pH-Wert in 10 - 15 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)	76
Tab. 19: pH-Wert in 20 - 25 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)	77
Tab. 20: pH-Werte in verschiedenen Bodentiefen der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten (Dedelow, 2007)	77
Tab. 21: Gesamtkohlenstoffgehalt (%) in 10 - 15 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)	78
Tab. 22: Gesamtkohlenstoffgehalt (%) in 20 - 25 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)	79
Tab. 23: Gesamtkohlenstoffgehalte (%) in verschiedenen Bodentiefen der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten (Dedelow, 2007)	79
Tab. 24: $C_{hwl}$ -Bereiche für Sand- und Lehmböden mit Jahresdurchschnittstemperaturen von 6 bis 10 °C und Jahresniederschlägen von 400 bis 800 mm	80
Tab. 25: $C_{hwl}$ -Gehalte (%) in 10 - 15 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)	80
Tab. 26: $C_{hwl}$ -Gehalte (%) in 20 - 25 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)	81
Tab. 27: $C_{hwl}$ -Gehalte (mg 100 g <sup>-1</sup> ) in verschiedenen Bodentiefen der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten (Dedelow, 2007)	82
Tab. 28: $N_t$ -Gehalte (%) in 10 - 15 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)	83
Tab. 29: $N_t$ -Gehalte (%) in 20 - 25 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)	83
Tab. 30: $N_t$ -Gehalte (mg 100 g <sup>-1</sup> ) in verschiedenen Bodentiefen der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten (Dedelow, 2007)	84

Tab. 31: N <sub>hwl</sub> -Gehalte (mg 100 g <sup>-1</sup> ) in 10 - 15 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)	85
Tab. 32: N <sub>hwl</sub> -Gehalte (mg 100 g <sup>-1</sup> ) in 20 - 25 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)	85
Tab. 33: N <sub>hwl</sub> -Gehalte (mg 100 g <sup>-1</sup> ) in verschiedenen Bodentiefen der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten (Dedelow, 2007)	86
Tab. 34: Das C/N-Verhältnis in 10 - 15 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem; 2006)	87
Tab. 35: Das C/N-Verhältnis in 20 - 25 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem; 2006)	88
Tab. 36: Das C/N-Verhältnis in verschiedenen Bodentiefen der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten (Dedelow, 2007)	88
Tab. 37: Determinationskoeffizienten (R <sup>2</sup> ) der linearen Regression (r) in 10 - 15 cm Bodentiefe in Berlin-Dahlem (2006)	91
Tab. 38: Determinationskoeffizienten (R <sup>2</sup> ) der linearen Regression (r) in 20 - 25 cm Bodentiefe in Berlin-Dahlem (2006)	91
Tab. 39: Die KAK <sub>pot</sub> -Werte (cmol kg <sup>-1</sup> ) in verschiedenen Bodentiefen der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten (Dedelow, 2007)	91
Tab. 40: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Korntrag (dt ha <sup>-1</sup> ; 86 % TS) von Hafer (2006)	98
Tab. 41: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf Bestandesdichte (Rispen je m <sup>2</sup> ) von Hafer (2006)	99
Tab. 42: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf das Tausendkorngewicht (g) von Hafer (2006)	99
Tab. 43: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf das Hektolitergewicht (kg hl <sup>-1</sup> ) von Hafer (2006)	100
Tab. 44: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf Rohproteingehalt (%) von Hafer (2006)	104
Tab. 45: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Ölgehalt (%) von Hafer (2006)	105
Tab. 46: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Keimdichte (Pflanzen je m <sup>2</sup> ) von Winterweizen (2007)	105

Tab. 47: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefe auf den Kornertrag (dt ha <sup>-1</sup> ; 86 % TS) von Winterweizen (2007)	106
Tab. 48: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Strohertrag (dt ha <sup>-1</sup> TM) von Winterweizen (2007)	107
Tab. 49: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Bestandesdichte (Ähren pro m <sup>2</sup> ) von Winterweizen (2007)	108
Tab. 50: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Kornzahl je Ähre von Winterweizen (2007)	109
Tab. 51: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf das Tausendkomgewicht (g) von Winterweizen (2007)	109
Tab. 52: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf das Hektolitergewicht (kg hl <sup>-1</sup> ) von Winterweizen (2007)	110
Tab. 53: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Rohproteingehalt (%) von Winterweizen (2007)	116
Tab. 54: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Stärkegehalt (%) von Winterweizen (2007)	117
Tab. 55: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Fallzahl (s) von Winterweizen (2007)	118
Tab. 56: Der Ertrag von Körnermais (dt ha <sup>-1</sup> ) in den untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten in Dedelow (2007)	118

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
Abb.	Abbildung
ASS	Ammonsulfatsalpeter (26% N)
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
$\text{CaCl}_2$	Kalziumchlorid
$\text{CaCO}_3$	Calciumcarbonat
$\text{C}_{\text{hwl}}$	heißwasserlöslicher Kohlenstoff
C/N	Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis
$\text{CO}_2$	Kohlenstoffdioxid
$\text{C}_{\text{org}}$	organisch gebundener Kohlenstoff
$\text{C}_t$	Gesamtkohlenstoff
DIN	Deutsches Institut für Normung
dt	Dezitonne
DW	Durchdringungswiderstand
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Eisen(III)-oxid
FW	Fruchtwechsel
GF	Getreidefolge
GPV	Grobporenvolumen (Vol.-%)
ha	Hektar
$k_{(\psi)}$ -Funktion	Wasserspannungs-Durchlässigkeitsfunktion
$k_f$	gesättigte Wasserleitfähigkeit
KAK	Kationenaustauschkapazität
$\text{KAK}_{\text{eff}}$	effektive Kationenaustauschkapazität

KAK <sub>pot</sub>	potentielle Kationenaustauschkapazität
KK	Korn-Kali (40% K <sub>2</sub> O, 6% MgO)
Ko. Kalk	kohlensaurer Kalk (90% CaCO <sub>3</sub> )
K <sub>u</sub>	ungesättigte Wasserleitfähigkeit
Ls4	stark sandiger Lehm
LSD	Least significant difference
M	molare Masse
M.-%	Masseprozent
max.	Maximum
min.	Minimum
MPa	Megapascal
N	Stickstoff
nFK	nutzbare Feldkapazität (Vol.- %)
N <sub>hwl</sub>	heißwasserlöslicher Stickstoff
NN	normal Null
N <sub>t</sub>	Gesamtstickstoff
P	Parzelle
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Phosphorpentoxid
pF	dekadischer Logarithmus des Matrixpotentials
PWP	permanenter Welkepunkt (Vol.- %)
r	Lineare Regression
R <sup>2</sup>	Determinationskoeffizient
RETC	Retention Curve Program
SAS	Soil Aggregate Stability
SI2	schwach lehmiger Sand
SI3	mittel lehmiger Sand
SI4	stark lehmiger Sand

SPT	Superphosphat Triple (46% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )
Stmd.	Stallmistdüngung
Su2	schwach schluffiger Sand
Su3	mittel schluffiger Sand
t	Tonne
Tab.	Tabelle
TGL	Technische Güte- und Lieferbedingungen
TM	Trockenmasse
TRD	Trockenrohdichte
TS	Trockensubstanz
Vol.-%	Volumenprozent
ZALF schung	Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsfor-
$\alpha$	Irrtumswahrscheinlichkeit
$\Theta$	relativer Wassergehalt
$\theta$	volumetrischer Wassergehalt
$\theta_s$	volumetrischer Sättigungswassergehalt
$\theta_r$	volumetrischer residualer Wassergehalt
$\Psi_m$	Matrixpotential
$\mu\text{m}$	Mikrometer
$\theta_{(\psi)}$ -Funktion	Wassergehalts-Wasserspannungsfunktion

## 1. Einleitung

Der Schutz des Bodens und die Erhaltung seiner Fruchtbarkeit sind Grundvoraussetzungen für eine nachhaltige Landnutzung. Der Einsatz vielfältiger Untersuchungsmethoden führt dazu, dass Agroökosysteme nicht mehr einseitig bezüglich des Ertrages sondern nach der Interaktion zwischen den Bodenbearbeitungssystemen und der Bodenqualität bewertet werden sollen. Die Interaktion zwischen Bodenbearbeitungsintensität, Bodeneigenschaften und Pflanzenertrag sollte daher im Mittelpunkt des wissenschaftlichen Interesses stehen. Um dieses zu unterstützen wurde 1998 im Bundesbodenschutzgesetz "die Bodennutzung im Rahmen der guten fachlichen Praxis" (BBodSchG, §17, Absatz 2) festlegt.

Die geringen Nährstoffreserven und das Nährstoffbindevermögen und vor allem das geringe Wasserhaltevermögen sind die wesentlichen Ursachen für die minderwertige Ertragsfähigkeit der Sandböden (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2010). Die vorliegenden Untersuchungen in den verschiedenen Bodennutzungssystemen in dieser Arbeit umfassen hauptsächlich diese beschriebenen Bodenarten. Außerhalb dieser substratbedingten Bodeneigenschaften sind geringe Niederschlagshöhen in Betracht zu nehmen, welche für das Land Brandenburg und Berlin charakteristisch sind (KRÜCK, 1999). Verbunden mit diesen geringen Niederschlagshöhen kann es über die Jahre in den Erträgen zu größeren Schwankungen kommen (EREKUL, 2000). Aufgrund der in den intensiven landwirtschaftlichen Bodennutzungssystemen mit konventioneller Bodenbearbeitung häufig zu beobachteten Problemen, wie z.B. die Verschlämmung und Verkrustung der Bodenoberfläche bzw. die Bodenerosion und die Bodenverdichtung, bekommen Bodenbearbeitungssysteme mit reduzierter Eingriffsintensität eine zunehmende Bedeutung (BEISECKER, 1993). Besondere Beachtung findet in dieser Arbeit, dass die bodenphysikalischen Parameter eine Indikatoreigenschaft haben. Dies ist von Bedeutung für das Monitoring und die Bewertung von Auswirkungen der zu testenden Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenqualität. Im Sinne einer nachhaltigen Landnutzung muss es das Ziel sein, standortangepasste Verfahren zu entwickeln, welche sowohl den Anforderungen an den Umwelt- und Ressourcenschutz als auch an die Produktivität und die Ökonomie gerecht werden, was unter verschiedenen Bewirtschaftungsmethoden nur auf langfristig angelegten Versuchsflächen möglich ist.



## **2. Stand des Wissens**

### **2.1 Bodenschutz und nachhaltige Landnutzung**

Böden sind Teil der belebten obersten Erdkruste des Festlandes (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2010). Der Boden erfüllt eine Reihe lebenswichtiger Funktionen für Mensch und Umwelt (UMWELTBUNDESAMT, 2004) und ist keine erneuerbare Ressource. In den letzten Jahrzehnten standen zunehmend Fragen des Bodenschutzes bzw. der Bodengesundheit („soil health“), der Auswirkungen auf die Umwelt (Kohlendioxidbelastung der Atmosphäre durch Humusabbau) und der Ökonomie im Mittelpunkt der Betrachtungen. Um den Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre zu reduzieren, wird gelegentlich vorgeschlagen, durch die pfluglose Bodenbearbeitung Kohlenstoff im Boden in Form von höheren Humusgehalten zu speichern (JOSCHKO ET AL., 2007). Der Boden spielt hier eine wichtige Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf. Die Kohlenstoffspeicherung im Boden ist wichtig für die Milderung des globalen Klimawandels (SHI ET AL., 2009). Konservierende Bodenbearbeitung reduziert die Bodenstörung, schont den Boden und den Wasserhaushalt und sequestriert den organischen Kohlenstoffgehalt, welcher gleichzeitig auch die Kosten der landwirtschaftlichen Produktion senkt. Indirekt verbessert der organische Kohlenstoffgehalt die chemischen und physikalischen Bedingungen der Böden durch zunehmende Kationenaustauschkapazität, Verbesserung der Aggregatstabilität und die Erhöhung der Wasserretention und der Bodenbelüftung (LEE ET AL., 2009).

Der Mensch hat zu allen Zeiten die Böden genutzt bzw. kultiviert, um ihren Ertrag zu steigern. Durch Besiedlung, intensive landwirtschaftliche Produktion, Rohstoffabbau, Deponierung von Schadstoffen und Verkehr wurde der Boden immer stärker geschädigt und zerstört. Aufgrund dieser Ursachen und des zunehmenden Bedarfs an Nahrung sind der Erhalt, der Schutz und die Fruchtbarkeit des Bodens für den Menschen von großer Bedeutung. Des Weiteren hat der Mensch auch eine Verantwortung für seine Umwelt und für künftige Generationen (MONTANARELLA, 2011).

Wichtige Verfahren zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und gleichzeitig zur Verbesserung der Kohlenstoffsequestrierung sind: Das Management der organischen

Rückstände, Mulch-Landwirtschaft und Fruchtwechsel. Die Anpassung der Bodenbearbeitung ist von besonderer Bedeutung für den Kohlenstoffzustand im Boden, weil sie die Kohlenstoffdynamik direkt und indirekt beeinflusst (LOPEZ FANDO UND PARDO, 2011).

Bodenschonende Bearbeitungssysteme für Ackerkulturen sind ursprünglich in Trockengebieten entwickelt worden, in erster Linie um den Boden vor Erosion und Austrocknung zu schützen, aber auch um Bestellaufwand und Kosten zu reduzieren (RIEGER, 2001).

Seit Jahrzehnten liegt der Fokus der wissenschaftlichen Untersuchungen und auch die Diskussion in der Praxis auf der Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit (LAUBENGEIGER ET AL., 2006). Unter Bodenfruchtbarkeit wird die natürliche und nachhaltige Fähigkeit des Bodens verstanden, den Pflanzen als Standort zu dienen und langjährig Pflanzenerträge von hoher Qualität zu erzeugen (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2010; GISI ET AL., 1997). Da der eher unauffällige Verlust des Bodens an fruchtbarkeitsbestimmenden Eigenschaften monokausal nicht zu erfassen ist, muss vielmehr das komplexe Zusammenspiel zwischen Merkmalen der Bodenchemie, -physik und -biologie betrachtet werden (FORSTREUTER, 1999). Die Bodenqualität besteht aus drei wesentlichen Aspekten der physikalischen, chemischen und biologischen Qualität und hat Auswirkungen auf die bodenphysikalischen Prozesse im Boden, wie z.B. Wasserbewegung und die Belüftung sowie auf chemische und biologische Prozesse (LI ET AL., 2011). Neben den sichtbaren Anzeichen des Verlustes an Bodenfruchtbarkeit, wie Bodenerosion durch Wasser und Wind oder Verschlammung und Verkrustung der Ackeroberfläche, sind die nicht so sichtbaren Probleme zu nennen, die sich aus Humusverarmung und Bodenschadverdichtung ergeben. Diese, oft auch als „schleichende“ Degradierung bezeichnete Verschlechterung der Bodenfruchtbarkeit hat weitere nachteilige Folgen für den Boden, wie eingeschränkte Wasserinfiltration und Durchwurzelbarkeit sowie Trinkwassergefährdung und Eutrophierung der Oberflächengewässer (vornehmlich durch Verlagerung von Nitrat, Phosphat und Pflanzenschutzmitteln) (SCHMIDT, 2004).

Der Schutz des Umweltmediums Boden wurde in der Entwicklung des europäischen Umweltrechts vergleichsweise spät in konkreter Form in Angriff genommen. Das sechste Umweltaktionsprogramm der Europäischen Kommission, das vom Europäischen Parlament und Rat 2002 beschlossen worden ist, macht darauf aufmerksam,

dass die Gefahren der Böden zwar innerhalb der Gemeinschaft auftreten, jedoch lokal unterschiedlich stark ausgeprägt sind. In der EU sind 16 % der Böden von Degradationsprozessen betroffen. In den zehn Mitgliederstaaten, die am 01.05.2004 in den Verbund der Europäischen Union aufgenommen wurden, beläuft sich der Anteil auf geschätzte 35 % (SCHEIL, 2007). Als dringendste Probleme für diese Länder gelten insbesondere die Erosion, der Rückgang an organischer Substanz sowie die fortschreitende Versiegelung von Böden. Ein wichtiger Hinweis für den Bodenverlust durch Erosion wird allein in den Mittelmeerregionen mit mehr als  $15 \text{ t ha}^{-1}$  angegeben. Der Rückgang an organischer Substanz ist ebenfalls im Mittelmeerraum von besonderer Bedeutung: Bei knapp 75 % der Böden Südeuropas wurde mit 3,4 % ein geringer beziehungsweise mit 1,7 % ein sehr geringer Anteil an organischer Substanz gemessen, wobei in beiden Fällen bereits von einem Vorstadium der Desertifikation gesprochen werden kann (SCHEIL, 2007). Die Materialien des Europäischen Büros für Bodenschutz machen für diese Verschlechterung auch ein Missmanagement in der Bodenbearbeitung verantwortlich (MONTANARELLA, 2011) (siehe auch Kapitel 2.2.). Die konservierende Bodenbearbeitung und ihre häufigste Erscheinungsform „no-tillage“ wurde entwickelt, um die Bodenerosion zu vermindern und die Verdunstung - durch die Beibehaltung der Mulch auf der Bodenoberfläche - zu reduzieren, damit das Bodenwasser, insbesondere in ariden oder semi-ariden Gebieten, gespeichert werden kann (ALVAREZ UND STEINBACH, 2009).

Deutschland war mit dem 1998 in Kraft getretenen Bundesbodenschutzgesetz (BBODSCHG, 1998) nach den Niederlanden und Italien schließlich der dritte Mitgliedsstaat, der ein eigenständiges Bodenschutzgesetz erließ (LUDWIG UND PETERSEN, 2007). Eine Besonderheit dieses Gesetzes ist der eigenständige Paragraph, welcher sich ausschließlich mit den „Grundsätzen der guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft“ (§17) beschäftigt. Die nachfolgend genannten Vorsorgeaspekte zeigen, dass es bereits sehr wesentliche Forderungen zum Schutz des Bodens in der landwirtschaftlichen Nutzung gibt. Demzufolge hat der Nutzer so zu wirtschaften, dass:

- die Bodenbearbeitung unter Berücksichtigung der Witterung grundsätzlich standortangepasst zu erfolgen hat,
- die Bodenstruktur erhalten oder verbessert wird,
- Bodenverdichtungen, insbesondere durch Berücksichtigung der Bodenart, Bodenfeuchtigkeit und des von den zur landwirtschaftlichen Bodennutzung eingesetzten Geräten verursachten Bodendrucks soweit wie möglich vermieden werden,

- Bodenabträge durch eine standortgemäße Nutzung, insbesondere durch Berücksichtigung der Hangneigung, der Wasser- und Windverhältnisse sowie der Bodenbedeckung möglichst vermieden werden,
- die naturbetonten Strukturelemente der Feldflur, insbesondere Hecken, Feldgehölze, Feldraine und Ackerterrassen, die zum Schutz des Bodens notwendig sind, erhalten werden,
- die biologische Aktivität des Bodens durch entsprechende Fruchtfolge-gestaltungen erhalten oder gefördert wird und
- der standorttypische Humusgehalt des Bodens, insbesondere durch eine ausreichende Zufuhr an organischer Substanz oder durch Reduzierung der Bearbeitungsintensität erhalten wird (BBODSCHG; §17).

Das Ziel einer nachhaltigen landwirtschaftlichen Bodennutzung ist die Förderung und Verbesserung der standortspezifischen Ertragsfähigkeit des Bodens unter Vermeidung unerwünschter Nebeneffekte (SOMMER ET AL, 1994).

## **2.2 Einfluss der Bodenbearbeitung und der Standortfaktoren auf bodenphysikochemische und pflanzenbauliche Parameter**

Pflanzenenerträge in hoher Qualität und Quantität benötigen standortangepasste Systeme der Bodenbearbeitung. Es gibt verschiedene Bodenbearbeitungssysteme, die auf bestimmten historischen Traditionen und Erfahrungen der Landnutzer beruhen (ELLMER, 2003). Verschiedene Bodenbearbeitungssysteme lösen differenzierte Wirkungen in den Böden aus, die kurz- oder langfristige Veränderungen des Bodenzustandes nach sich ziehen. Seit den letzten Jahrzehnten wachsen die Betriebsgrößen sowie auch die überbetriebliche Nutzung von Maschinen und Geräten. Um die Arbeit zum optimalen Zeitpunkt zu ermöglichen und um zusätzlich Zeit und Kosten zu sparen, ist die Leistungsfähigkeit und zwangsläufig auch die Masse von Traktoren, selbstfahrenden Arbeitsmaschinen und Transportfahrzeugen gestiegen (FRASSL, 2008). Die Böden, die insbesondere an organischer Substanz auf einem niedrigen Niveau liegen und deswegen schlecht strukturiert sind, werden durch übermäßige Bodenbearbeitungen auch anfällig für die Winderosion (SINGH ET AL., 2011). Im Zuge beginnender Mechani-

sierung und Rationalisierung der Landwirtschaft in den 60er Jahren rückten schädliche Bodenveränderungen mehr und mehr in den Mittelpunkt bodenkundlicher Forschungsarbeiten. Begründet war dies durch die zunehmende Sorge einer irreparablen Bodengefügeschädigung aufgrund stark ansteigender Gesamtmassen landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen (CRAMER, 2006).

Die Bodenbearbeitung mit dem Pflug (**konventionelle Bodenbearbeitung**) bewirkt nicht nur eine Lockerung des Bodens, sondern auch eine Umwendung des Bodenmaterials in der Regel bis 30 cm Tiefe. Hierbei entsteht eine so genannte Ackerkrume. Dieser Zustand führt zur Beeinträchtigung der Durchdringung der Wurzeln in die Bodentiefe. Dabei wird die Wasseraufnahme verhindert, insbesondere bis zum Ende der Vegetationsperiode, wenn der Niederschlag wenig und die Evapotranspiration hoch ist (CHEN ET AL., 2011). Durch die Bearbeitung bzw. die Aufarbeitung und Wendung werden organische Reststoffe und Unkräuter tief in den Boden eingearbeitet, was zu einer Mobilisierung von Nährstoffen führt, was auf ackerbaulichen Flächen eine Ursache für verstärkte Kohlenstoffverluste ist (REGINA UND ALAKUKKU, 2010). Die saubere Bodenoberfläche bietet hiermit der Sätechnik optimale, störungsfreie Bedingungen (FIEDLER, 2010). Neben diesen Vorteilen ergeben sich nach der Pflugarbeit auch Nachteile für den Boden. An erster Stelle ist hier die erhöhte Bodenerosions- und Verschlammungsgefährdung auf der nach der Ernte ungeschützten Oberfläche zu nennen, in deren Folge eine große Menge Nährstoffe vom Acker erodiert wird. Die Oberflächen der gepflügten Böden sind von Beginn der Saatbettbereitung bis zur Ernte schutzlos und sind von Wind- und Wassererosion gefährdet, indem die aufschlagenden Wassertropfen die Bodenaggregate zerstören. Die zahlreich vorliegenden Erkenntnisse aus der internationalen Forschung belegen, dass fortdauernder Einsatz des Pfluges zur Bodenbearbeitung die Bodendegradation durch Erosion begünstigt (KREITMAYR, 2005). Eine langjährige differenzierte Bodenbearbeitungsstudie belegt, dass bei konventioneller Bewirtschaftung im Zeitraum von 11 Prüffahren im Schnitt  $16,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ , bei Mulchsaat  $4,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  und bei Direktsaat  $2,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  Boden erodieren (ROSNER UND KLIK 2005). Darüber hinaus kann die Bodenstruktur infolge von Bodenverdichtung stark beeinträchtigt werden (EHLERS ET AL., 2003). Nach einer Studie von JORDAN ET AL. (2010) in Spanien wird darauf hingewiesen, dass auf einem Dauerfeldversuch auf lehmigen Bodensubstraten die Anwendung von Mulchmaterialien zu einer Verbesserung der bodenphysikalischen und -chemischen Eigenschaften geführt hat. Das Mulchmaterial auf der Ackerfläche reduziert den Wasserabfluss der Bodenoberfläche und minimiert die

Erosionsgefahr, insbesondere bei den Flächen, wo der Humusgehalt sehr gering ist (JORDAN ET AL., 2010).

Durch die starke Belastung der schweren Landmaschinen werden die Bodenaggregate zerstört und durch die Verdichtung mit der Zeit kann sich unterhalb der Ackerkrume der Verdichtungshorizont bilden. Infolge einer hohen Belastung wird das Porensystem im Boden vielfach soweit reduziert, dass im Boden ablaufende Prozesse zeitweilig oder dauerhaft gestört sein können. Traditionelle Bodenbearbeitungssysteme erhöhen zunächst den Makroporenanteil des Bodens, aber mit der Zeit reduzieren sie die Kontinuität der Poren (HILL, 1990). In der Regel bedeutet das für einen Pflanzenbestand eine Verschlechterung der Versorgung mit Luft und Wasser und führt zu einer dauerhaften Beeinträchtigung der Ertragsfähigkeit und Ertragssicherheit (FRIELINGHAUS, 2001). In einem Feldversuch mit ehemaligen Fahrgassen weisen die mehrjährigen Folgewirkungen konventioneller Landbewirtschaftung mit wiederholten Fahrwerkseinwirkungen im ersten Folgejahr einen stark verminderten Grobporenanteil und erhöhte Festigkeit unterhalb der Bearbeitungstiefe auf, welche zu Störungen im Wurzelwachstum, zu verminderter Nährstoffaufnahme und zu einem Rückgang des Pflanzenertrages führen (DANNOWSKI, 1995). Eine Studie von SCHEIL (2007) in England und Wales zeigte, dass der Anteil von Flächen mit geringer organischer Substanz in den Böden im Zeitraum von 1980 bis 1995 von 35 % auf 42 % anstieg, was auf eine veränderte Bodenbewirtschaftung zurückzuführen war.

Die **konservierende Bodenbearbeitung** ist die Reduzierung der Grundbodenbearbeitungsintensität nach Art, Häufigkeit und Tiefe des mechanischen Eingriffs sowie das Belassen der Pflanzenrückstände nahe bzw. auf der Oberfläche (SOMMER, 1998). Die Anwendung der konservierenden Bodenbearbeitung hat weltweit deutlich zugenommen. Die Direktsaat ist in den letzten 10 Jahren weltweit von 6 auf 47 Millionen Hektar angewachsen. Die USA waren die Pioniere und sind auch heute noch führend in der konservierenden Bodenbearbeitung (BRANDSTETTER, 2006). Moderne Direktsaat-Techniken werden weltweit auf über 100 Millionen Hektar Land angewendet. Trotz der bewährten Vorteile wird die reduzierte Bodenbearbeitung nur auf 25 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland praktiziert; Direktsaat findet keine Anwendung (VERCH ET AL., 2009).

Die konservierende Bodenbearbeitung erfolgt in unterschiedlicher Intensität mit nichtwendenden Geräten, wie z.B. Grubber und Scheibenegge. Die Bodenstruktur bleibt

damit fast ungestört, wird also nur gelockert und Pflanzenreststoffe, auch als „Mulchmaterial“ bezeichnet, werden oberflächennah belassen. Im Gegensatz zur konventionellen Bodenbearbeitung führt die geringere Intensität der Bodenbearbeitung zu einer Zunahme der Lagerungsdichte in den weniger gelockerten Bereichen der Krume. Direktsaat kann zu Überverdichtung des Bodens führen, welche nachteilige Auswirkungen auf die Bodenstruktur und auf den Ertrag hat (CAVALIERI ET AL., 2009). PRONIN (2002) berichtet ebenfalls über höhere Lagerungsdichten und Durchdringungswiderstände auf einem sandigen Substrat nach konservierender Bodenbearbeitung; die größte Zunahme beobachtete er in einer Bodentiefe von 20 cm. Andererseits zeigte dieser sandige Standort nach 6 Jahren unterschiedlicher Bewirtschaftung erhöhte Leitfähigkeitswerte in 5-30 cm, da die Porosität und Porenkontinuität verbessert wurde.

Neben der geringen Intensität der Bodenbearbeitung trägt auf der Oberfläche das angereicherte Mulchmaterial zu einer Förderung der Bodenorganismenaktivität bei, was eine relativ höhere Humusakkumulation bewirkt. Flächen unter Bodenruhe und permanenter Bodenbedeckung mit ständiger Zufuhr an organischer Bodensubstanz und verlangsamten Abbauvorgängen sind in der Regel humusreich (KRÜCK, 1999). Die Auswertung von Bodenbearbeitungsversuchen in Bernburg (seit 1969) und Seehausen (1966-2002) zeigte, dass es bei konservierender Bodenbearbeitung und Direktsaat im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung mit dem Pflug zu einer Anreicherung von  $C_{org}$  im oberen Krumenbereich von 0 bis 10 cm kommt (ULRICH, 2008). SCHMIDT ET AL. (2002) konnten im Vergleich zwischen Pflugeinsatz, konservierender Bodenbearbeitung sowie Direktsaat, insbesondere in der Tiefe von 0-5 cm, eine Erhöhung der mikrobiellen Biomasse, des Regenwurmbesatzes und auch des Humusgehaltes mit abnehmendem Grad der Bearbeitungsintensität ermitteln. Während sich die Humusgehalte im Tiefenbereich von 5-10 cm beim Vergleich der Systeme nicht unterschieden, konnte für die mikrobielle Biomasse eine deutliche Zunahme zwischen Pflug- und konservierender Bearbeitung festgestellt werden. Nach einer Studie von JACOBS ET AL. (2009) wurden auf zwei verschiedenen ackerbaulichen Versuchsfeldern, die seit 37 und 40 Jahren in Deutschland (Garte Süd und Hohes Feld, in der Nähe von Göttingen) bearbeitet werden, die Effekte der langjährigen differenzierten Bodenbearbeitungen (reduzierte und konventionelle Bodenbearbeitung) auf den Kohlenstoffgehalt in Böden in zwei verschiedenen Bodentiefen (0–5 cm und 10–20 cm) untersucht. Es wurde dabei festgestellt, dass in beiden untersuchten Versuchsfeldern in beiden Bodentiefen der  $C_{org}$ -Gehalt bei der reduzierten Bodenbearbeitung im Gegensatz zur konservierenden

Bodenbearbeitung höhere Werte aufwies. Auch VOGELER ET AL. (2009) belegen in einer Studie, dass sich auf einem Dauerfeldversuch in Deutschland (Braunschweig), der seit 1998 mit verschiedenen Bodenbearbeitungssystemen (konventionelle und konservierende Bodenbearbeitung mit Kombination von drei verschiedenen Düngungsapplikationen) durchgeführt wird, der Humusgehalt in 0–30 cm Bodentiefe bei der konservierenden Bodenbearbeitung - im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung - erhöht hat.

Die organische Bodensubstanz beeinflusst die Struktureigenschaften des Bodens, insbesondere die Infiltration von Wasser und die Aggregatstabilität. Deshalb sind konservierende Bodenbearbeitungssysteme von Bedeutung, die den Gehalt an organischem Kohlenstoff erhöhen (FRANZLUEBBERS, 2001). Die durch Bodenbearbeitungssysteme verbesserte Bodenstruktur fördert die Wasserspeicherung, da die hydraulischen Eigenschaften sich verändern (RAWLS UND PACHEPSKY, 2002). Bodenverdichtungen hemmen die biologische Aktivität eines Bodens, z.B. den Abbau und Umsatz der organischen Substanz. Andererseits sind in einem unverdichteten belebten Boden gerade Mikroorganismen an dem Aufbau stabiler Aggregate beteiligt (EMMERLING, 2002). Die verbesserte Aggregation der Bodenpartikel und die Auflage von Pflanzenresten in Verbindung mit einer verbesserten Infiltrationsfähigkeit vermindert größtenteils die Verschlammung des Oberbodens. Durch das funktionsfähigere Gefüge, welches sich auf die Wasserhaltekapazität positiv auswirkt, werden weniger Nährstoffe, Pflanzenschutzmittel und Düngemittel aus dem Boden ausgetragen. Die geringere Bodenbearbeitung bedingt eine stabilere Bodenstruktur, so dass der Unterboden weniger stark verdichtet und so die Gefahr der Pflugsohlenbildung verringert wird. Im Vergleich von konventioneller Bodenbearbeitung mit Direktsaat führt letztere weniger zur Zerstörung der Bodenstruktur, verbunden mit einer Erhöhung der Infiltrationsrate sowie der Aggregatstabilität (MCGARRY ET AL., 2000). Nach einer Studie von ABID UND LAL (2008) wurden auf einem 14-jährigem Dauerfeldversuch in den USA, Ohio State University, die Effekte verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren - mit Kombination von zwei verschiedenen Drainagesystemen - auf ausgewählte bodenphysikalische Eigenschaften untersucht. Es wurde daraus geschlussfolgert, dass der Wechsel von konventioneller Bodenbearbeitung zu Direktsaat den Bodenoberflächenabfluss reduzieren, die Aggregatstabilität erhöhen und die hydraulischen Bodeneigenschaften verbessern kann.

Ziele der konservierenden Bodenbearbeitung sind die Verhinderung der Bodenverschlammung und Verringerung des Bodenabtrags, die Schaffung eines tragfähigeren



Bodengefüges als vorbeugenden Schutz gegen Verdichtungen, die Steigerung der biologischen Aktivität im Boden und der Erhalt der Bodenstruktur.

Zum Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung auf die Erträge von Kulturpflanzen finden sich in der Literatur unterschiedliche Aussagen, die sich oftmals widersprechen (MCFARLAND ET AL., 1990 UND CARTER, 1991). REXROTH (2000) und TEBRÜGGE (2001) vertreten die Meinung, dass die reduzierte Bodenbearbeitung unter mitteleuropäischen Verhältnissen zu höheren Erträgen der Kulturpflanzen im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung führt. Nach KAHNT (1995) wirkt sich reduzierte Bodenbearbeitung auf den Ertrag von Winterweizen auf sandigen Böden nur in sehr geringem Maße negativ aus. BRUNOTTE (2007) weist auf sehr unterschiedliche Erträge zwischen konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung in Abhängigkeit von Standort und Pflanzenart hin. Auf leichten Standorten erwies sich jedoch nach KRÜCK (1999) die konventionelle Bodenbearbeitung gegenüber der konservierenden Bodenbearbeitung auf den Ertrag von Weizen günstiger. ELLMER ET AL. (2000) weisen darauf hin, dass auf dem Dauerfeldversuch in Berlin-Dahlem bei flacher Bodenbearbeitung im Mittel tendenziell höhere Erträge erzielt wurden, wobei Fruchtarten der Sommerung Mehrerträge erreichten und Wintergetreide eher negativ reagierte.

### **2.2.1 Bodenstruktur und Bodenverdichtung**

Durch eine Ackernutzung wird nicht nur die Vegetationsdecke, sondern auch der Boden in seinem strukturellen Aufbau und in seinem Chemismus verändert (AKKERMANN, 2004). Je nach Lagerung der einzelnen Bodenpartikel und der Aggregate führen sie zu unterschiedlich ausgeprägten Porensystemen, die sich hinsichtlich Porengrößenverteilung und –kontinuität unterscheiden können. Die Porengrößenverteilung ist hinsichtlich der Primärporen von Körnung und Kornform und hinsichtlich der Sekundärporen vom Bodengefüge und damit von der Bodenentwicklung abhängig (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2010). Als „primäre Bodenpartikel“ werden die einzelnen mineralischen Bestandteile (Ton, Schluff und Sand) und die organische Bodensubstanz bezeichnet. Sekundäre Bodenpartikel sind Komplexe, die aus verschiedenen einzelnen primären Bodenpartikeln bestehen. In der Literatur werden die sekundären Bodenpartikel aufgrund der Aggregation verschiedener Bodenpartikel als Aggregate bezeichnet, welche wesentlich durch die textuelle Zusammensetzung des Bodens, die biologische Aktivität, die organische Bodensubstanz und durch Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) beein-

flusst werden. Das Porensystem und die Bodenpartikel dienen der Beschreibung der Form der Bodenstruktur.

Als ein weiterer Begriff wird für die festen Bestandteile des Bodens als Teilgefüge die „Bodenmatrix“ gekennzeichnet. Das Porensystem der Bodenmatrix lässt sich nach unterschiedlichen Anteilen an Grob-, Mittel- und Feinporen (Porengrößenklassen) untergliedern. Hiermit werden die größeren Bodenspalten und Risse sowie durch Wurzeln und Bodentiere gebildete Bioporen nicht mehr zur Bodenmatrix, sondern zum Makroporensystem des Bodens gezählt. Das Porenvolumen wird durch Poren unterschiedlicher Größe und Gestalt differenziert.

Die Bodenstruktur verändert sich, indem sie aufgrund natürlicher Prozesse wie Setzen, Einschlämmen und Schrumpfen eine Verdichtung hervorruft und durch Quellen eine Auflockerung. Eine Veränderung der Bodenstruktur erfolgt durch menschliche Aktivitäten, z.B. hat der zunehmende Einsatz schwerer Landmaschinen negative Auswirkungen auf das Bodengefüge, indem sie bei ungünstigen (feuchten) Bodenverhältnissen es verdichten und damit den Hohlraum bzw. die Wasser- und Luftführung des Bodens beschädigen, was in zahlreichen Literaturstudien auch belegt wird. Durch eine Bodenverdichtung ändert sich die Bodenstruktur und die daraus resultierenden bodenphysikalischen Kennwerte wie Porosität, Lagerungsdichte, gesättigte und ungesättigte Wasserleitfähigkeit. Es ist davon auszugehen, dass durch eine geringere Bearbeitungintensität weniger stabile Aggregate mechanisch zerstört werden, wie nachfolgende Ausführungen zeigen. Ein achtjähriger Demonstrationsversuch in Zollikofen auf der Dauerbeobachtungsparzelle „Oberacker“ (2003) belegte, dass bei der Direktsaat-Variante im Oberboden deutlich stabilere Aggregate im Vergleich zum Pflugverfahren vorhanden waren. Demgegenüber wurden bei dem Pflugverfahren im Oberboden kaum strukturierte Aggregate festgestellt. Dies ist - neben dem Verzicht auf den Pflugeinsatz - vor allem auch auf die erhöhte Anzahl und Aktivität der Regenwürmer zurückzuführen (BODENBERICHT, 2003). Nach einer Studie von ALVAREZ ET AL. (2009) in Argentinien/Pampas konnten mittels konservierender Bodenbearbeitung (im Vergleich zur konservierenden Bodenbearbeitung und Direktsaat) höhere Aggregatstabilitäten und Infiltrationsraten nachgewiesen werden. Demgegenüber waren die Werte der Trockenrohdichte in 0 - 20 cm Bodentiefe höher als im Vergleich zur konventionellen. Die Aggregatstabilität verbesserte sich in den schlecht strukturierten Böden um durchschnittlich 70 % unter Direktsaat im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung.

Nach den Ergebnissen von APPEL ET AL. (2008) in einem neunjährigen Feldversuch mit unterschiedlicher Bodenbearbeitung weisen die pfluglos bewirtschafteten Parzellen im Vergleich zu der Pflugvariante höhere Porenvolumenanteile auf. Auch in der Unterkrume wurden in der pfluglosen Variante höhere Porenvolumenanteile festgestellt. Da konservierend bearbeitete Böden eine höhere Anzahl vertikal-kontinuierlicher Makroporen besitzen, kann zusätzlich überschüssiges Wasser in Makroporen schnell von der Bodenoberfläche in tiefere Schichten abgeleitet werden (ZIMMERLING UND SCHMIDT 2002). Bei einer anderen Studie belegt DANNOWSKI (1995), dass auf einem untersuchten sandigen Moränenstandort durch wiederholte mechanische Belastung von Fahr-gassen ökologisch unverträglich hohe Verdichtungen im Boden verursacht wurden. Die oft geäußerte Auffassung, dass leichte Böden relativ druckempfindlich sind, konnte jedoch hier in den tieferen sandigen Bodenschichten nicht bestätigt werden. TEBRÜGGE UND DÜRING (1999) weisen in einer Studie auf einem Sandstandort als auch auf Löss-böden darauf hin, dass der Bodendruck in 20 cm und 40 cm Bodentiefe durch die er-zeuigte Auflast in der Direktsaat-Variante sowohl in der Ackerkrume als auch im Unter-boden am geringsten ist. Auf denselben Böden untersuchten die o.g. Autoren die Po-renraumverteilung vor und nach einer Maschinenüberfahrt und ermittelten bereits bei einer Überfahrt vor allem bei der Pflugvariante eine besonders starke Reduktion bei den weiten Grobporen ( $> 50 \mu\text{m}$ ). Bei einem Versuch von EITZINGER UND KLAGHOFFER (1995) mit drei verschiedenen Primärbodenbearbeitungsgeräten und mit vier verschie-denen Bearbeitungstiefen wurde jedoch festgestellt, dass in der Grubber-Variante im Vergleich zur Pflug-Variante in den gleichen Bearbeitungstiefen geringere Porenanteile existieren. In einer weiteren Studie auf den zwei Dauerversuchsflächen in den sächsi-schen Lössgefiliden wurde bei dauerhaft konservierender Bodenbearbeitung eine deut-liche Differenzierung der Lagerungsdichten in Abhängigkeit der Bodenbearbeitungstie-fe erhalten (MÜLLER, 2002). Eine weitere Studie von ATKINSON ET AL. (2009) belegt, dass bei zwei unterschiedlichen Bodenbearbeitungsverfahren (Pflug und Scheiben-pflug) in einem Feldversuch (University of Nottingham) - welcher im Jahr 2005 angelegt wurde - höhere Makroporenanteile bei der Scheibenpflug-Variante festgestellt wurden.

Auf ökologisch bewirtschafteten Versuchsflächen in Griechenland wurde im Jahr 1995 in einer Studie ausgewiesen, dass mit zunehmender Eingriffsintensität auf die Grund-bodenbearbeitung der Makroporenanteil abnahm. Die höchsten Werte der mittleren Aggregatdurchmesser und der höchste Anteil Makroporen im Boden wurden in den Parzellen der Direktsaat unter alleiniger Anwendung von Stallmist, bzw. in Kombination

mit mineralischer Düngung, gemessen. Auch der Durchdringungswiderstand war signifikant höher in der Direktsaat-Variante (BILALIS ET AL., 2001).

### **2.2.2 Wasserhaushalt**

Für eine günstige Vegetationsentwicklung ist eine möglichst große Wasserspeicherung im Wurzelraum von Vorteil (WÖHLER, 1999). Der entscheidende Punkt für den Wasserhaushalt des Bodens ist der Anteil des pflanzenverfügbaren Bodenwassers. Dabei spielen die Wasserbindungskräfte, die Wasserkapazität und die jeweiligen Wasserspannungsverhältnisse eine Rolle. Essentielle Quellen für den Bodenwasserhaushalt ist das Niederschlagswasser, welches als Haftwasser gegen die Schwerkraft im Boden kapillar festgehalten wird. Demgegenüber steigt das Grundwasser im Boden kapillar auf. Treibende Kräfte sind dafür die Wasserverdunstung an der Bodenoberfläche und der Druck des Grundwasserspiegels.

Der Einfluss verschiedener Bodenbearbeitungssysteme auf die Bodenwasserverfügbarkeit wurde nach drei Versuchsjahren im Nordwesten Sloweniens in einem schluffigen Lehm Boden (Albic Luvisol) untersucht. Sowohl der gravimetrische Bodenwassergehalt in allen 3 Schichten (0 - 5, 15 - 20 und 30 - 35 cm) als auch das pflanzenverfügbare Wasser waren in allen Versuchszeiträumen bei dem Direktsaat-System am größten und bei der konventionellen Methode am kleinsten. Der am häufigsten aufgetretene Trend beim gravimetrischen Bodenwassergehalt und beim verfügbaren Wasser war bei Direktsaat größer als bei der konservierenden Bodenbearbeitung, gefolgt von reduzierter und konventioneller Bodenbearbeitung (KOSURIC ET AL., 2001).

In einer zweijährigen Studie von SCHWEN ET AL. (2011) wurde auf einem Dauerfeldversuch in Österreich, der 1997 angelegt wurde, bei unterschiedlichen Bodenbearbeitungsverfahren (Konservierende Bodenbearbeitung, Konventionelle Bodenbearbeitung und Direktsaat) auf einem schluffig lehmigem Bodensubstrat die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit von der höchsten zur niedrigsten in der Reihenfolge nach als konservierende Bodenbearbeitung, konventionelle Bodenbearbeitung und Direktsaat erfasst.

Die Direktsaat hat einen positiven Einfluss auf den Bodenwasserhaushalt; insbesondere während ausgeprägten Trockenperioden wirkt sich dies positiv auf den Pflanzener-

trag aus. In unbearbeiteten Böden kann Wasser aus tieferen Schichten kapillar nachgeliefert werden (BODENBERICHT, 2003).

## **2.3 Bedeutung der organischen Substanz**

Zahlreiche Forschungsarbeiten befassen sich mit der Bedeutung der organischen Substanz für die Verbesserung der Bodeneigenschaften der Ackerflächen. Die organische Bodensubstanz ist neben den mineralischen Bestandteilen des Bodens die zweitgrößte Fraktion im Boden (GREGORICH ET AL., 1997). Der Humus bzw. die organische Bodensubstanz beinhalten alle abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Bestandteile im Boden, die biochemischen Abbau- und Umwandlungsprozessen unterliegen (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2010). Der gravierende Bodeneingriff durch Bodenbearbeitung beeinflusst maßgeblich die Wechselwirkung zwischen Bodengefüge, Humus und bodenbiologischen Prozessen (BECK, 1991; LARINK, 1998). Der Einfluss der Humusdynamik auf den Nährstoffhaushalt und die Bodenstruktur ist insbesondere auf leichten Böden für die Nährstoffversorgung der Pflanze außerordentlich wichtig und Grundlage für Low-Input Systeme (KRÜCK, 1999). Bodenökosysteme unter Direktsaat vermögen Nährstoffe vermehrt in pflanzenverfügbarer Form freizusetzen (BODENBERICHT, 2003). Allerdings ist das Potenzial der verschiedenen Ökoregionen auf der Welt zur Kohlenstoffsequestrierung von den klimatischen Bedingungen abhängig. In tropischen und gemäßigten Regionen - im Gegensatz zu trockenen Gebieten - ist die Kohlenstoffsequestrierung höher, weil die Bedingungen für das Pflanzenwachstum günstiger sind (LOPEZ FANDO ET AL., 2011).

Im Zusammenhang mit dem Abbau durch das Edaphon entstehen darüber hinaus Umsetzungs- und Stoffwechselprodukte der Bodenorganismen, welche das Bodengefüge und die Aggregatstabilität günstig beeinflussen (KRÜCK, 1999). Dies führt zu besserer Durchlüftung, Wasserführung und -speicherung und Durchwurzelbarkeit der Böden. Der langjährige Verzicht auf jede Bodenbearbeitung auf dem Demonstrationsversuch der Dauerbeobachtungsparzelle „Oberacker“ führt zu einer Anreicherung von Humus im Oberboden, was sich positiv auf die Nährstoffdynamik auswirkte (BODENBERICHT, 2003). In dieser Versuchsanlage ist der Humusgehalt in der Direktsaatvariante nach acht Versuchsjahren um  $10,4 \text{ t ha}^{-1}$  bzw.  $600 \text{ g m}^{-2}$  Kohlenstoff angestiegen. Eine weitere Studie belegt, dass langjährige unterschiedliche Bodenbearbeitung zur Differenzierung der absoluten Humusmengen im Ap-Horizont führt. Sie wirkt sich hier wesent-

lich stärker auf die vertikale Verteilung in der Krume aus. Nichtwendende Bodenbearbeitung führt besonders zur Humusanreicherung in der Oberkrume (0 - 5, 5 - 10 cm) (HOFMANN, 2003). Die Ergebnisse aus einem 1981/82 auf trockener Löss-Schwarzerde angelegtem Fruchtfolgeversuch zeigen nach neun Versuchsjahren in Dreifelderfolgen keine wesentlichen Veränderungen im Humusgehalt des Bodens durch pfluglose Winterweizenbestellung. Auf humusärmeren Böden dagegen fand WALTHER (1986) nach mehrjähriger nichtwendender flacher Bodenbearbeitung in der Ackerkrume eine Erhöhung und im Unterboden eine Verringerung des Humusgehaltes im Vergleich zu stemtem Pflügen (KREUZ, 1991). EMMERLING (2002) vertritt die Meinung, dass durch eine reduzierte Grundbodenbearbeitung, wie z.B. durch den Einsatz von Schichtenpflug oder Schichtengrubber, die organische Bodensubstanz und bodenmikrobiologische Eigenschaften in der Krume insgesamt gefördert werden können.

### 3. Material und Methoden

Die Grundlage der vorliegenden Arbeit sind Versuchsergebnisse, die im Zeitraum von 2005-2007 in der Lehr- und Forschungsstation der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin am Standort Berlin-Dahlem, Versuchsanlage Statischer Versuch Bodennutzung DIII, und in der Forschungsstation Dedelow des Zentrums für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) Müncheberg, Versuchsanlage V751/5, ermittelt wurden. Beide Versuchsstandorte werden durchgehend somit als Berlin-Dahlem bzw. Dedelow bezeichnet.

#### 3.1 Standortbeschreibung

##### 3.1.1 Berlin-Dahlem

Die Versuchsfläche in Berlin-Dahlem wurde 1923 von Kurt Opitz angelegt und ist heute einer der ältesten Dauerversuche in Deutschland und der Welt (KÖHN UND ELLMER, 2009) (Abb.1).



Abb. 1: Standort Berlin-Dahlem der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät mit Versuchsflächen (Satellitenaufnahme; Quelle: Google Earth, November 2010)

Der Versuchsstandort Berlin-Dahlem liegt bei 52° 28" nördlicher Breite und 13° 18" östlicher Länge in einer Höhe von 51 m über NN. Der Boden hat sich auf einer Grundmoränenhochfläche aus Geschiebemergel weichseleiszeitlicher Ablagerungen, die mit Geschiebedeck- und Flugsanden überlagert wurden, gebildet. Die Entkalkungsgrenze liegt bei ca. 1 m, verläuft jedoch je nach Mächtigkeit des anstehenden Geschiebemergels sehr heterogen mit teilweise steilen (fast vertikalen) Grenzen. Die Hauptbodenart ist schwach schluffiger bis mittel lehmiger Sand (Krume) und schluffig lehmiger Sand bis sandig toniger Lehm (Unterboden) (ausführlich dazu im Ergebnisteil).

Auf der Fläche dominieren Parabraunerden und Fahlerden (FAO-Klassifikation Albic Luvisol). Die Bodenprofilansprache von SCHWEITZER (2010) an dem Lehr-Bodenprofil (Lage siehe Abb. 1) repräsentiert den am Standort dominierenden Bodentyp Fahlerde (Subtyp Braunerde-Fahlerde, Abb. 2). Das Profil hat die Bodenform Braunerde-Fahlerde aus Kryoturbatlehmsand über Fließlehm über tiefen Moränencarbonatsandlehm mit der Horizontfolge Ap/Ael/Ael+Bt/Bt/elCv (AG BODENSYSTEMATIK, 2005; Profildfoto und Beschreibung siehe Tab. 1).

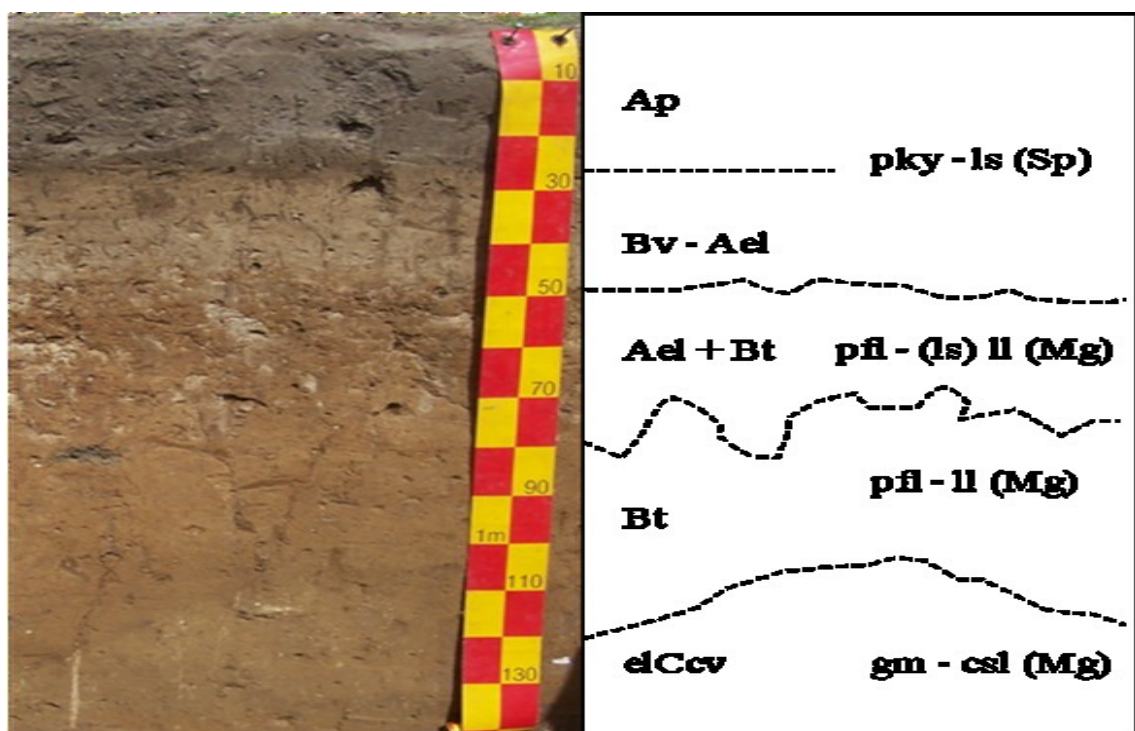


Abb. 2: Bodenprofil am Standort Berlin–Dahlem, Braunerde-Fahlerde aus Kryoturbatlehmsand über Fließlehm über tiefem Moränencarbonatsandlehm mit der Horizontfolge Ap/Ael/Ael+Bt/Bt/elCv des Lehr-Bodenprofils Berlin-Dahlem (aus SCHWEITZER, 2010)



Die Profilbeschreibung für das Profil ist in der Tab. 1 enthalten und ermöglicht die Nachverfolgung zur boden- und substratsystematischen Zuordnung.

Tab. 1: Bodenprofil in Berlin-Dahlem: Profilbeschreibung (aus SCHWEITZER, 2010)

Horizont	Tiefe (cm)	Beschreibung
rAp	0 - 30	Pflughorizont aus periglaziärem Lehmsand, durch regelmäßiges Pflügen nach unten eben und scharf abgegrenzt, schwach humos, dunkelbraun (10YR3/3), Bodenart schwach lehmiger Sand, stark durchwurzelt, Einzelkorn- bis Bröckelgefüge
Bv – Ael	30 - 50	Übergangshorizont, lessiviert mit Merkmalen der Verbraunung aus periglaziärem Lehmsand, Untergrenze unregelmäßig, sehr schwach humos, durch Verarmung an Ton und Eisenoxiden hell- bis gelbbraun (10YR6/4-6/6), Bodenart schwach lehmiger bis schwach schluffiger Sand, schwach durchwurzelt, mit Merkmalen biologischer Aktivität (Wurmgänge), Einzelkorngefüge
Ael + Bt	50 - 70	Tonanreicherungshorizont aus Fließlehm mit tonverarmtem Ael-Material durchsetzt, deutliche Tonhäutchen, dunkelgelbbraun (10YR4/6), Bodenart stark sandiger Lehm wechselnd mit schwach lehmigem Sand, schwach durchwurzelt
Bt	70 - 130	Tonanreicherungshorizont, dunkelgelbbraun (10YR4/6), Bodenart stark sandiger Lehm, deutliche Tonhäutchen besonders in Klüften, vereinzelt Wurzeln, Polyeder- bis Subpolyedergefüge, in feuchtem Zustand Kohärentgefüge
elCcv	110 - 140	Ausgangsgestein aus Moränenkarbonatsandlehm (Geschiebemergel), hellgelbbraun (10YR6/4-6/6), Bodenart stark lehmiger Sand, karbonathaltig, mit Merkmalen sekundärer Karbonateinwaschung (Kalkadern), Plattengefüge

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden eigenständig und bezogen auf die Forschungsfrage ausgewählte Bodenkennwerte untersucht (siehe Kapitel 4). Zur allge-

meinen Standortkennzeichnung können die im Versuchsführer für Berlin-Dahlem genannten Werte genutzt werden (Tab. 2 und Tab. 3).

Tab. 2: Textur und ausgewählte bodenchemische Parameter am Standort Berlin-Dahlem (aus SCHWEITZER, 2010)

Horizont	Durchschn. Mächtigkeit (cm)	Krongrößenfraktion (%)			Bodenart	C <sub>org</sub> (%)	N <sub>t</sub> (%)	pH
		Sand	Schluff	Ton				
rAp	30	72,6	19,7	7,7	SI2	1,01	0,09	6,1
Bv – Ael	20	72,1	22,8	5,1	SI2	0,14	0,01	6,2
Ael + Bt	20	63,8	17,2	19,0	Ls4	0,13	0,02	6,3
Bt	50	60,0	22,4	17,5	Ls4	0,13	0,01	6,1
elCcv	>20	64,9	21,3	13,8	SI4	n.b.	n.b.	6,4

Die Ergebnisse bzw. Analysendaten am Bodenprofil zeigen den Lessivierungsprozess mit erhöhten Tongehalten im Unterboden. Die Humusgehalte im Ap-Horizont sind durch die jahrelange Nutzung als Grünfläche vor Anlage des Schauprofils begründet.

Tab. 3: Textur und ausgewählte bodenphysikalische Parameter am Standort Berlin-Dahlem (aus VERSUCHSFÜHRER, 2004)

Schicht (cm)	Korngrößenfraktion (%)			Bodenart	FK (mm)	PWP (mm)	nFK (mm)
	Sand	Schluff	Ton				
0-30	72,1	25,0	2,9	Su3	72,5	13,7	58,8
30-50	69,8	25,5	4,7	Su3	45,5	9,6	35,9
50-80	65,3	23,4	11,3	SI3	73,6	28,3	45,3

Der Versuchsstandort Berlin-Dahlem liegt im Grenzbereich zwischen ozeanisch und kontinental geprägtem Klima mit einer mittleren Temperaturamplitude zwischen Sommer und Winter bzw. Tag und Nacht (KAUTZ, 2004). Die jährliche Niederschlagshöhe schwankt in weiten Grenzen zwischen 363 und 731 mm (1971 - 2000), wobei in der Periode April bis August häufig negative klimatische Wasserbilanzen auftreten. Im langjährigen Mittel beträgt die Niederschlagshöhe 540 mm und die Jahresdurchschnittstemperatur 9,6 °C (CHMIELEWSKI, 2009) (Abb. 3 und Abb. 4).

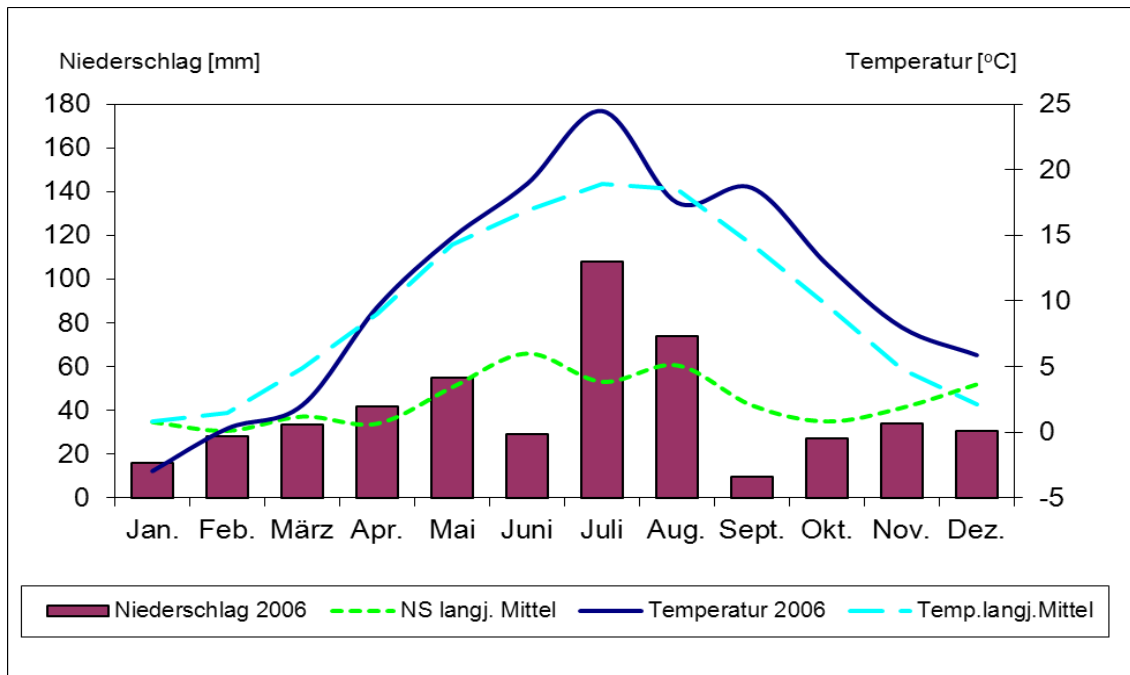


Abb. 3: Witterungsverlauf 2006 (Niederschlag und Temperatur im Vergleich zum langjährigen Mittel 1971 - 2000) (CHMIELEWSKI, 2006)

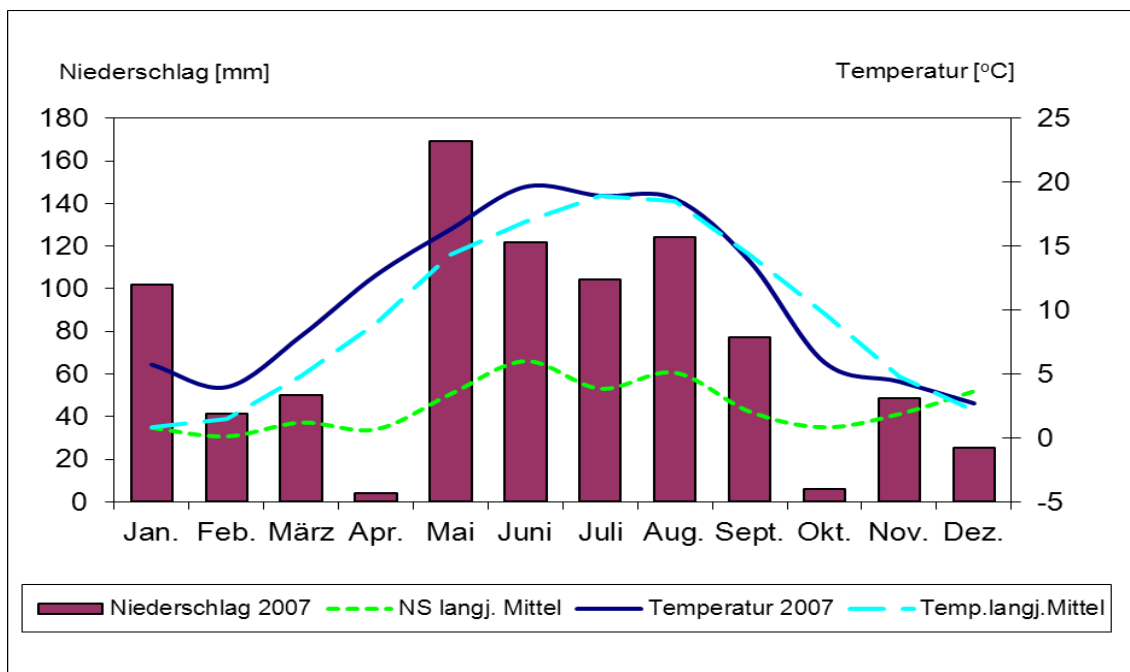


Abb. 4: Witterungsverlauf 2007 (Niederschlag und Temperatur im Vergleich zum langjährigen Mittel 1971 - 2000) (CHMIELEWSKI, 2007)

Das Jahr 2006 lag mit einem Jahresmittel der Lufttemperatur von 10,8 °C über dem langjährigen Durchschnitt. Nach deutlich negativen Abweichungen der Lufttemperatur bis Ende März und eher ausgewogenen Temperaturen im April und Mai setzte sich im Juni und vor allem im Juli warmes Sommerwetter durch. Für Juli 2006 wurde ein neuer Temperaturrekord von 24,5 °C registriert. Lediglich unterbrochen durch einen kühlen August hielt diese positive Temperaturanomalie bis zum Jahresende an. Die Periode September-November 2006 zählte somit zu den wärmsten Herbstperioden (13,1 °C) seit Beginn der Aufzeichnungen in Dahlem (CHMIELEWSKI, 2006).

Der Beginn der Vegetationsperiode (allgemeines Überschreiten des Tagesmittels der Lufttemperatur von 5 °C) wurde für den 26.3. berechnet und lag damit deutlich später als im langjährigen Mittel (10.3.). Erst mit dem deutlichen Unterschreiten der Tagesmitteltemperatur unter 5 °C am 23.12. wurde das Vegetationsende relativ spät im Jahr 2006 erreicht (CHMIELEWSKI, 2006).

Die Jahresniederschlagshöhe betrug mit 487,7 mm im Jahr 2006 90 % des langjährigen Durchschnitts (540 mm). Die meisten Niederschläge fielen im extrem warmen Juli, aber auch im kühlen August. Das größte Niederschlagsdefizit wurde infolge sehr stabiler Wetterverhältnisse im September beobachtet. Weitere Defizite waren im Januar und Juni zu verzeichnen. Die Trockenperiode im Juni wirkte sich besonders auf die Ertragsbildung der schnelllebigen sommerannuellen Kulturarten (Sommergetreide, Körnerleguminosen) negativ aus (CHMIELEWSKI, 2006).

Das Jahr 2007 war genauso warm wie das bisher wärmste Jahr (1934) seit Beginn der Wetteraufzeichnungen in Berlin-Dahlem im Jahr 1931 (CHMIELEWSKI, 2007). Der Witterungsverlauf im Jahr 2007 war mit einem Jahresmittel der Lufttemperatur von 11,2 °C durchschnittlich um 1,6 °C wärmer als das langjährige Mittel. Der Temperaturverlauf bis September war durch überdurchschnittliche Temperaturen gekennzeichnet. Der Winter von November bis März 2006/2007 war mit Monatstemperaturen bis 8,0 °C überdurchschnittlich warm. Mit einem fast zwei Wochen früheren Eintritt im Vergleich zum langjährigen Mittel begann die Vegetationsperiode am 25.02.2007.

2007 war das niederschlagsreichste Jahr seit Beginn der Wetteraufzeichnungen in Berlin-Dahlem im Jahr 1931 (CHMIELEWSKI, 2007). Die Niederschlagsverteilung im Jahresverlauf 2007 war ungleichmäßig. Die außergewöhnlich hohe Jahresniederschlagsmenge betrug mit 873,6 mm 61,8 % mehr als der langjährige Durchschnitt von 540 mm. Die

meisten Niederschläge fielen in den Monaten Januar (101,9 mm), Mai (169,1 mm), Juni (121,7 mm), Juli (104,4 mm) und bemerkenswerterweise im August mit einer Niederschlagsmenge von 124,2 mm. Die größten Niederschlagsdefizite wurden im April und Oktober mit 4,0 mm und 5,9 mm beobachtet.

### 3.1.2 Dedelow

Der Versuchsstandort Dedelow liegt im Bundesland Brandenburg, im „Uckermärkischen Hügelland“, etwa 100 km nördlich von Berlin (Abb. 5 und Abb. 6) und repräsentiert Standortverhältnisse der Uckermark und des südlichen Mecklenburg-Vorpommerns.



Abb. 5: Lage des Standortes Dedelow (Quelle: Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V. Müncheberg)



Abb. 6: Luftbild des Standortes Dedelow (Quelle: Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V. Müncheberg)

Für die allgemeine Standortkennzeichnung können die im Exkursionsführer der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft DBG (2003) und der Forschungsstation Dedelow ZALF e.V. (2006) genannten Werte aufgeführt werden (Tab. 4 und Tab. 5).

Tab. 4: Ausgewählte bodenphysikalische Parameter zum Standort Dedelow (EXKURSIONSFÜHRER DER DBG, 2003)

Schicht (cm)	Korngrößenfraktion (%)			Boden- art	TRD (g cm <sup>-3</sup> )
	Sand	Schluff	Ton		
0-30	57,7	31,1	11,2	SI3	n.b.
30-45	57,3	28,6	14,1	SI4	1,61
45-80	51,6	23,5	24,9	Ls4	1,63

Tab. 5: Ausgewählte Bodenchemische Parameter zum Standort Dedelow (EXKURSIONSFÜHRER DER DBG, 2003)

Schicht (cm)	pH (CaCl <sub>2</sub> )	C <sub>t</sub> (M.-%)	C <sub>org</sub> <sup>1)</sup> (M.-%)	N <sub>t</sub> (M.-%)	KAK <sub>pot</sub> DIN <sup>2)</sup> cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	KAK <sub>eff</sub> DIN <sup>3)</sup> cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>
0-30	7,5	0,98	0,94	0,09	23,26	21,11
30-45	7,3	0,25	0,25	0,04	21,97	21,89
45-80	7,5	0,34	0,34	0,05	26,76	28,96

<sup>1)</sup> C<sub>org</sub> = C<sub>t</sub> – (CaCO<sub>3</sub> \* 0,12)

<sup>2)</sup> DIN ISO 13536

<sup>3)</sup> DIN ISO 11260

Der Boden ist ein sandiger Lehm mit einer durchschnittlichen Ackerzahl von 42. Die Bodenform ist eine Parabraunerde aus Sand (Geschiebedecksand) über Lehm (Geschiebemergel) (FAO-Klassifikation Luvisol), welche die Horizontfolge Ap/Al/Bt/ilCv/elCc/elCv hat.

Die Erfassung der Klimadaten für den Standort Dedelow erfolgte in der dem Versuchsfeld angeschlossenen Wetterstation der Forschungsstation Dedelow des Zentrums für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V. Müncheberg. Das langjährige Mittel der Lufttemperatur und der Niederschlagshöhe wurde zwischen 1985 und 2000 ermittelt.

Die langjährige Niederschlagsmenge betrug zwischen 1985 und 2000 500 mm, wobei im Jahr 2007 mit 761 mm ein bemerkenswert hoher Niederschlag zu erkennen ist. Die ungleichmäßige Niederschlagsverteilung im Jahresverlauf 2007 betrug im April mit 1 mm den ungewöhnlichsten Anteil im Vergleich zu dem einzelnen Monatsverlauf (Abb. 7).

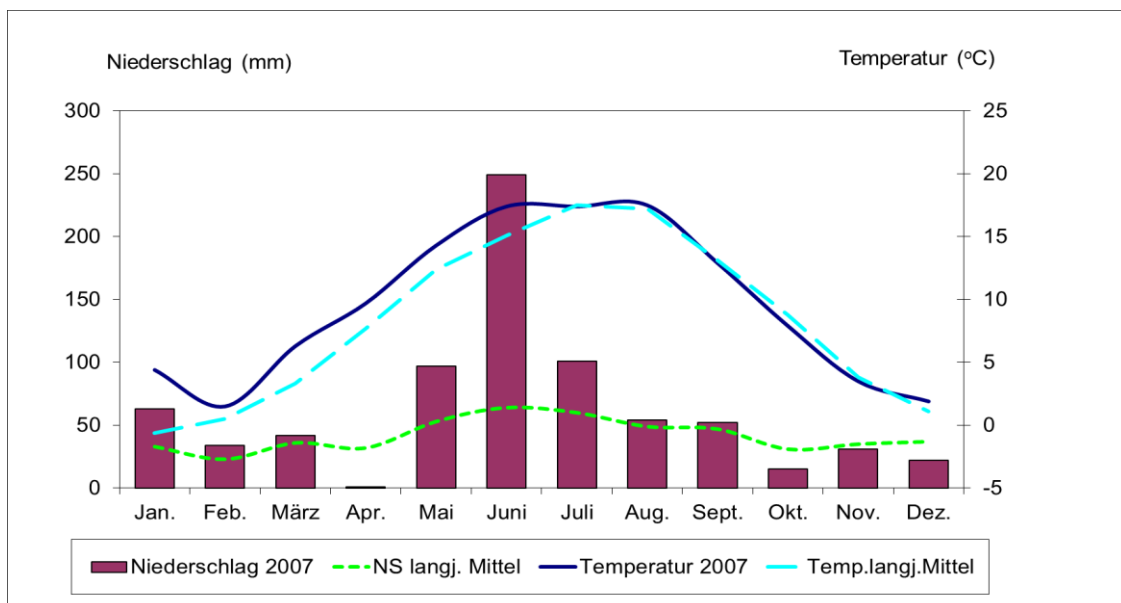


Abb. 7: Witterungsverlauf 2007 (Niederschlag und Temperatur im Vergleich zum langjährigen Mittel 1985 - 2000) (VERCH, 2008)

Bei den Niederschlagshöhen war der Juni mit einem Rekordwert von 249 mm herausragend. Mai, Juni und Juli 2007 verzeichneten einen außergewöhnlich höheren Niederschlagsverlauf im Vergleich zum langjährigen Mittel.

Der Temperaturverlauf bis Juli war durch überdurchschnittliche Temperaturen gekennzeichnet, wobei ab August bis Dezember ein ähnlicher Verlauf zu erkennen ist.

## 3.2 Feldversuche

### 3.2.1 Berlin-Dahlem

Der Dauerversuch DIII ist eine nicht randomisierte Spalt-/Streifenanlage mit 32 Versuchsgliedern, die in 6-facher Wiederholung miteinander kombiniert sind (KÖHN, 2000). Das Ziel dieses bereits im Jahr 1923 von Kurt Opitz angelegten und 1939 sowie 1967 erweiterten Dauerfeldversuchs bestand darin, den Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme, Düngungen (Kalk-, Stallmist- und Phosphordüngung) und Fruchtfolgen auf die Ertragsfähigkeit und Eigenschaften eines lehmigen Sandbodens festzustellen (Versuchsfaktoren und Faktorstufen, siehe Tab. 6).

Tab. 6: Genutzte Prüffaktoren und Faktorstufen am Standort Berlin-Dahlem

Prüffaktoren	Faktorstufen
Pflugtiefe	tief (T), ca. 28 cm flach (F), ca. 17 cm
Kalkdüngung	mit Kalk ohne Kalk
Stallmistdüngung	mit Stallmistdüngung ohne Stallmistdüngung
Fruchtfolge	Getreidefolge (GF)

Abb. 8 veranschaulicht die komplette Versuchsanlage und die Einteilung der ausgewählten Versuchsparzellen in Bezug auf die Faktorstufen. Für die Untersuchungen im Rahmen der vorgelegten Arbeit wurden die Faktoren Phosphor und Fruchtfolge nur insofern betrachtet, dass alle Untersuchungen auf mit Phosphor gedüngten Böden und nur in der Getreidefolge durchgeführt wurden (siehe Tab. 7). Somit standen 48 Parzellen zur Untersuchung zur Verfügung (Parzellengröße 20 m<sup>2</sup>). Die Bodenprobeentnahme erfolgte jeweils in 10 - 15 cm und 20 - 25 cm Bodentiefe.





Die Menge der mineralischen und organischen Düngung war fruchtartenspezifisch verschieden. Zur Anwendung kamen die Düngerformen kohlensaurer Kalk (für  $\text{CaCO}_3$ ), Superphosphat (für  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), Kalimagnesia (für  $\text{K}_2\text{O}$ ) und Ammonsulfatsalpeter (für N).

### 3.2.2 Dedelow

Bei der Versuchsanlage V751/5 handelt es sich um einen langjährigen Parzellenversuch zur Thematik der aufwandreduzierten Grundbodenbearbeitung. Dieser Parzellenversuch wurde im Jahr 1985 als eine faktorielle Streifenanlage mit 5-feldriger Fruchtfolge angelegt. Diese Anlage besteht aus 5 Bodenbearbeitungsvarianten, die in 3 Intensitätsstufen bezüglich der Dünge- und Pflanzenschutzmittelausbringung unterteilt worden sind. Die Größe einer Einzelparzelle beträgt  $54 \text{ m}^2$ . Die in Dedelow vorhandenen nachfolgenden Bodenbearbeitungsvarianten (a1 – a5, Tab. 8) wurden 2007 untersucht.

Die Fruchtarten in der Fruchtfolge sind generell Raps, Winterweizen, Körnermais, Winterweizen und Wintergerste, wobei im Untersuchungsjahr 2007 die Fläche mit Körnermais genutzt wurde. Beim Anbau von Körnermais mit der Vorfrucht Winterweizen wird als Zwischenfrucht Senf angebaut. Außerdem wird Wintergerste in der Direktsaatvariante durch Winterweizen ersetzt.

Tab. 8: Genutzte Prüfglieder und Bezeichnungen am Standort Dedelow

Prüfglied	Bezeichnung
a1	Pflug 25 cm tief
a2	Pflug 15 cm tief
a3	Mulchsaat 80 %, d.h. Grubber 15 cm (Ausnahme Pflug 15 cm zu Raps alle 5 Jahre, daher die Bezeichnung „80% Mulchsaat“)
a4	Mulchsaat 100 %; d.h. Grubber 10 cm
a5	Direktsaat

Abbildung 9 stellt die Versuchsanlage und die Einteilung der Versuchsparzellen in Bezug auf die Intensitätsstufen und Bearbeitungsvarianten dar.

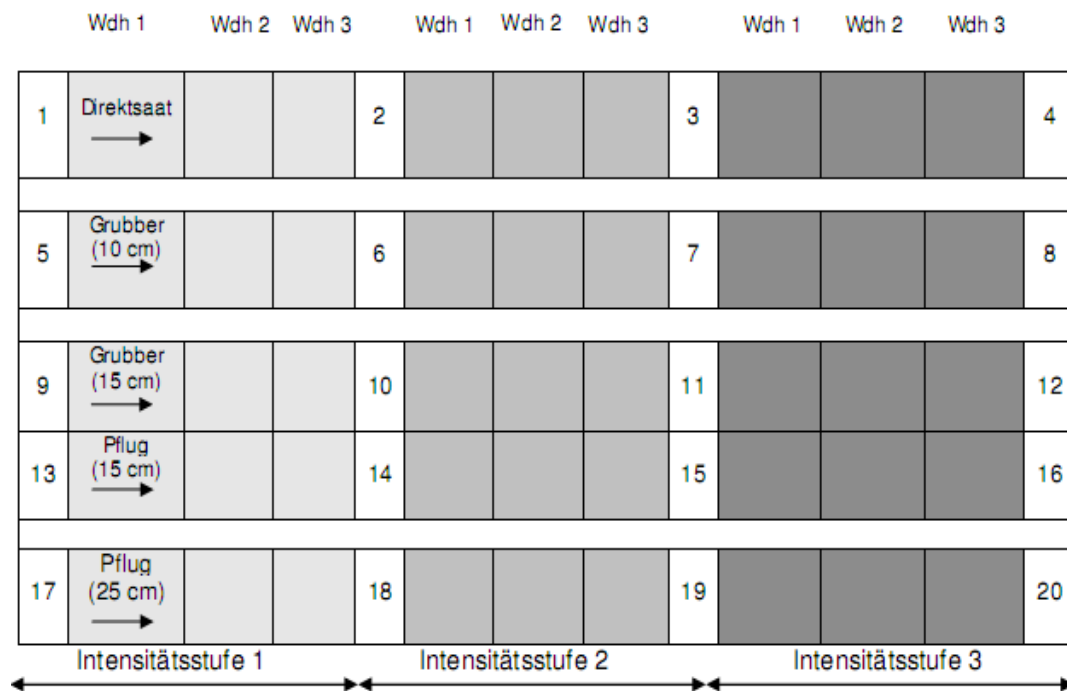


Abb. 9: Versuchsdesign V751/5 am Standort Dedelow (eigene Darstellung)

### 3.3 Untersuchungsparameter

Auf beiden Versuchsstandorten wurde mit sehr enger Rasterbohrung die Substratschichtung erfasst und später mittels des Computerprogramms „Surfer“ ausgewertet, um so bessere Informationen über die die Forschungsergebnisse beeinflussende Standortheterogenität zu erlangen. In Berlin-Dahlem wurden die ungestörten und gestörten Bodenproben gleichzeitig von den entsprechenden Parzellen aus 10 - 15 cm und 20 - 25 cm Tiefe entnommen und danach umgehend für sämtliche Analysen gelagert. In der Versuchsstation Dedelow wurden die entsprechenden Bodenproben nur aus den Randparzellen entnommen. Auf dem Versuchsstandort Berlin-Dahlem wurden die ungestörten Bodenproben im Frühjahr je nach Bestimmung des Gesamtkohlenstoffgehalts und in Dedelow je nach Bestimmung des Gesamtkohlenstoff- und Tongehalts aus 10 - 15 cm und 20 - 25 cm Tiefe (insgesamt 200 Stechzylinder) entnommen und kühl gelagert.

In der nachfolgenden Tab. 9 werden die untersuchten bodenphysiko-chemischen Parameter dargestellt, welche entweder standardisiert sind und somit in einer DIN bzw. TGL veröffentlicht sind oder es liegt eine kurze Beschreibung des Verfahrens vor. Spezielle Untersuchungsmethoden werden ausführlicher im Anschluss an die Tabelle beschrieben.

Tab. 9: Untersuchte Boden- und Pflanzenkennwerte an den beiden Versuchsstandorten Berlin-Dahlem und Dedelow

Parameter (Maßeinheit)	Dahlem	Dedelow	Verfahren	Wdh.	Tiefe	Parzellenanzahl
Textur (%)	x	x	Nasssieb- und Pipettverfahren nach KÖHN (TGL 31222/02)	2	10-15 cm und 20-25 cm	48 (Dahlem) und 20 (Dedelow)
Trockenrohdichte ( $\text{g cm}^{-3}$ )	x	x	100 $\text{cm}^{-3}$ Stechzylinder (DIN 19672, DIN 19681)	3	10-15 cm und 20-25 cm	16 (Dahlem) und 20 (Dedelow)
Aggregatstabilität (%)	x	x	Verfahren nach KEMPER UND KOCH (1966) und MURER ET AL. (1993); ausführliche Beschreibung im Kapitel 3.3.	3	10-15 cm und 20-25 cm	48 (Dahlem) und 20 (Dedelow)
Wasser Retentionskurve (pF-Kurve) und ungesättigte Wasserleitfähigkeit ( $K_u$ ) ( $\text{cm Tag}^{-1}$ )	x	x	Verdunstungsmethode und Anpassung nach VAN GENUCHTEN; ausführliche Beschreibung im Kapitel 3.3.	3	10-15 cm und 20-25 cm	16 (Dahlem) und 16 (Dedelow)
Durchdringungswiderstand (MPa)	x	x	Penetrologger	10	80 cm	48 (Dahlem) und 20 (Dedelow)
pH-Wert	x	x	DIN 19684, Teil 1 $\text{CaCl}_2$ Lösung mit dem pH-Meter	3	10-15 cm und 20-25 cm	48 (Dahlem) und 20 (Dedelow)
Gesamtkohlenstoffgehalt (%)	x	x	Methode DUMAS vario MAXCNS/Firma Elementar-Analytik HANAU	2	10-15 cm und 20-25 cm	48 (Dahlem) und 20 (Dedelow)
Gesamtstickstoffgehalt (%)	x	x	Methode DUMAS vario MAXCNS/Firma Elementar-Analytik HANAU	2	10-15 cm und 20-25 cm	48 (Dahlem) und 20 (Dedelow)
Heißwasserlöslicher Kohlenstoffgehalt ( $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ )	x	x	nach Schulz/Behm Methodenbuch I VDLUFA/4. Teillieferung	2	10-15 cm und 20-25 cm	48 (Dahlem) und 20 (Dedelow)
Heißwasserlöslicher Stickstoffgehalt ( $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ )	x	x	nach Schulz/Behm Methodenbuch I VDLUFA/4. Teillieferung	2	10-15 cm und 20-25 cm	48 (Dahlem) und 20 (Dedelow)

Parameter (Maßeinheit)	Dahlem	Dedelow	Verfahren	Wdh.	Tiefe	Parzellenanzahl
Organischer Kohlenstoffgehalt (%)	x	x	Rechnerisch ermittelt und bezogen auf das Verhältnis von Ct – (CaCO <sub>3</sub> * 0,12)	2	10-15 cm und 20-25 cm	48 (Dahlem) und 20 (Dedelow)
C/N Verhältnis	x	x	rechnerisch ermittelt und bezogen auf das Verhältnis von Corg zu Nt	2	10-15 cm und 20-25 cm	48 (Dahlem) und 20 (Dedelow)
KAK <sub>pot</sub> und KAK <sub>eff</sub> (cmol kg <sup>-1</sup> )	x	x	Bariumchloridlösung DIN 19684-8	1	10-15 cm und 20-25 cm	16 (Dahlem) und 20 KAKpot (Dedelow)
Keimdichte (Pflanzen m <sup>-2</sup> )	x		Nach Auflaufen der Pflanzen wurde mit Hilfe von Kunststoffstäbchen je Teilstück in 2 Reihen je 1m abgesteckt und alle aufgewachsenen Pflanzen im 3-Blatt-Stadium bestimmt.			48 (Dahlem)
Kornertrag (dt ha <sup>-1</sup> ; 86 % TS)	x	x	Kornertrag je Teilstück nach der Ernte gewogen und für jedes Teilstück die Trockensubstanzgehalte bestimmt. Umrechnung nach absolute Trockenmasse oder 86 % dt/ha umgerechnet			48 (Dahlem) und 20 (Dedelow)
Strohertrag (dt ha <sup>-1</sup> )	x		Strohertrag je Teilstück nach der Ernte gewogen und für jedes Teilstück die Trockensubstanzgehalte bestimmt. Umrechnung nach absolute Trockenmasse oder 86 % umgerechnet			48 (Dahlem)
Bestandsdichte (Ähren m <sup>-2</sup> )	x		Ähren einer Stichprobe manuell gezählt und auf Basisfläche von 1 m <sup>2</sup> umgerechnet			48 (Dahlem)
Kornzahl je Ähre	x		rechnerisch aus dem Einzelährenertrag und dem Tausendkorngewicht ermittelt			48 (Dahlem)

Parameter (Maßeinheit)	Dahlem	Dedelow	Verfahren	Wdh.	Tiefe	Parzellenanzahl
Tausendkorngewicht (g)	x		Die Körner aus einer Strichprobe mittels „Condador“ gezählt			48 (Dahlem)
Hektolitergewicht (kg)	x		Das Gewicht einer Teilstückprobe mit einer definierter Fallbeschleunigung in ein 250 ml-Messbehältnis fallen <u>lassen</u> und auf 1 hl umgerechnet			48 (Dahlem)
Siebsortierung (Gew. -%)	x		Bestimmung der Korngrößenverteilung mittels Langloch-Fraktionierer „Sortimat“ nach 5 Siebstufen (>3,0; 3,0-2,8; 2,8-2,5; 2,5-2,2; 2,2-2,0; <2,0 mm)			48 (Dahlem)
Fallzahl (s)	x		Nach Verkleisterung der Stärke im siedenden Wasserbad wird die Verflüssigung der Stärkepaste als Maß der Alpha-Amylase-Aktivität gemessen (nach Hagberg-Perten)			48 (Dahlem)
Proteingehalt in Korn und Mehl (%)	x		Durch Bestimmung des Stickstoffgehaltes im Aufschluss nach Kjeldahl			48 (Dahlem)
Ölgehalt (%)			Durch Bestimmung der chemischen Diethylether Extraktion Methode			48 (Dahlem)

Nachfolgend werden ausgewählte Spezialuntersuchungen erläutert.

### **Bestimmung des Substratwechsels:**

Für die Auswertung von Versuchen ist die Kenntnis der Bodenheterogenität von großer Bedeutung. Aufgrund der geologischen Entstehung spielt für die beiden Standorte insbesondere die Heterogenität der Substratschichtung eine Rolle. Für das Pflanzenwachstum ist von großer Bedeutung, in welche Tiefe die Wurzeln eindringen können und inwiefern unterschiedliche Substrate durch ihre speziellen Wasserspeichereigenschaften das Pflanzenwachstum beeinflussen können. Deshalb wurde auf beiden Versuchsstandorten Berlin-Dahlem bzw. Dedelow mit einer Rasterbohrung die Substratschichtung festgestellt. Es wurde jeweils eine Bohrung pro Parzelle bis 1,20 m mit dem Pürckhauer (insgesamt 48 Bohrungen für Berlin-Dahlem und 20 Bohrungen für Dedelow) niedergebracht und die Ergebnisse mit Hilfe des Computerprogramms „Surfer“ ausgewertet.

### **Durchdringungswiderstand:**

Die Durchdringungswiderstandsmessungen erfolgten auf beiden Versuchsstandorten im Frühjahr 2006 (Berlin-Dahlem) und 2007 (Dedelow) bei Feldkapazität. Dazu wurde der Penetrologger von der Firma Eijkelkamp benutzt. Mit dem Penetrologger wird der Widerstand, den der Boden beim Eindringen einer Bodensonde entgegensetzt, gemessen. Während des manuellen Einstichs des Sondenstabes erfasst das Gerät durch Ultraschallwellen die Tiefenmessung und Eindringgeschwindigkeit über eine auf die Bodenoberfläche gesetzte Metallplatte. Der Widerstand wird in 1 cm Abständen während des Einstichs gemessen. Der Sondenstab ermöglicht Messungen bis zu 80 cm Bodentiefe. Während der Messung werden die Daten sowohl numerisch als auch graphisch angezeigt, wodurch genauere Ergebnisse zur Beurteilung des Bodenzustandes im Feld erhalten werden. Die im Feld gewonnenen Daten werden im Gerät gespeichert und können auf einen PC übertragen und ausgewertet werden.

Auf beiden Versuchsstandorten wurden pro Parzelle 10 Einstiche vorgenommen. Die Messungen erfolgten mit einem Messkegel, der Abmaße von 1,0 cm<sup>2</sup> und 60° besaß.



**Aggregatstabilität:**

Die angewandte Methode zur Bestimmung der Aggregatstabilität (soil aggregate stability, SAS) basiert auf Arbeiten von KEMPER UND KOCH (1966) und MURER ET AL., (1993). Zur Analyse wurden von den beiden Versuchsstandorten Bodenproben aus zwei Bodentiefen entnommen (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), luftgetrocknet und auf 2 mm gesiebt. Je 4,0 g der Aggregate wurden auf 3 Siebe der Siebtauchapparatur gebracht. Eine zweite Probe wurde in analoger Weise vorbereitet. Die Stahlbecher der Siebtauchapparatur wurden mit ca. 80 ml destilliertem Wasser (22 - 25 °C) gefüllt und anschließend mit den 6 Sieben der Deckel aufgesetzt und der Motor gestartet. Nach 5 Minuten wurden die stabilen Aggregate mit destilliertem Wasser in Wägegläschen gespült und über Nacht bei 105 °C im Trockenschrank getrocknet. Das Tara-gewicht der Wägegläschen war vorher zu bestimmen. Die Wägegläschen mit den stabilen Aggre-gaten wurden im Exsikkator abgekühlt und gewogen. Zur Bestimmung des Sandanteils wurden die Aggregate in den Wägegläschen mit 0,1 M tetra-Natriumdiphosphat-Decahydratlösung überstaut. Auf dem Sieb eventuell zurückgebliebene Aggregate wurden zerstoßen. Der verbleibende Sandanteil wurde mit destilliertem Wasser gründlich gewaschen und die Wägegläschen gespült. Die Proben wurden über Nacht bei 105 °C getrocknet, in einem Exsikkator abgekühlt und gewogen. Die Auswertung der stabilen Aggregate erfolgte nach Gleichung 1.

$$(1) \quad SAS = ((M2-M3) / EW - (M3-M1)) * 100$$

mit:

SAS	=	Aggregatstabilität in %
M1	=	Masse des Wägegläschens,
M2	=	Masse des Wägegläschens, der stabilen Aggregate und des Sandes (g),
M3	=	Masse des Wägegläschens und des Sandes (g),
EW	=	Einwaage der luftgetrockneten Aggregate (g).

**Messung der Wasserretentionskurve (pF-Kurve) und der ungesättigten Wasser-leitfähigkeit:**

Bevor das Messverfahren sowie das Spezialgerät vorgestellt werden, soll nachfolgend grundsätzliches zur Theorie erklärt werden. Diese Ausführung dient zum besseren

Verständnis des VAN-GENUCHTEN-Ansatzes (VAN GENUCHTEN, 1980), der zur Bestimmung der pF-Kurve genutzt wurde.

Der Wassergehalt hängt eng mit dem Matrixpotential  $\Psi_m$  zusammen. Für die Betrachtung der ungesättigten hydraulischen Verhältnisse wird entweder der dimensionslose volumetrische Wassergehalt  $\theta$  als Volumenanteil vom Gesamtporenvolumen oder die ebenfalls dimensionslose relative Sättigung  $\Theta$  (Gleichung 2) als Anteil vom Gesamtporenvolumen angegeben (BARTH, 2003).

(2)

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

mit:

$\Theta$ : relativer Wassergehalt,

$\theta$ : volumetrischer Wassergehalt,

$\theta_s$ : volumetrischer Sättigungswassergehalt,

$\theta_r$ : volumetrischer residualer Wassergehalt.

Der Sättigungswassergehalt  $\theta_s$  ist das maximale Wasservolumen, welches der Boden in seinem Porenraum aufnehmen kann. Bei idealer Sättigung ohne Lufteinschlüsse ist er mit dem Gesamtporenvolumen identisch. Der residuale Wassergehalt  $\theta_r$ , welcher sich durch Wasserentzug in flüssiger Phase einstellt, ist der minimale Wassergehalt. Im Rahmen der experimentellen Messgenauigkeit kann normalerweise  $\theta_r = 0$  gesetzt werden.

Die  $\Theta - \Psi_m$  Beziehung wurde von VAN GENUCHTEN (1980) mit folgender Funktion beschrieben (Gleichung 3):

(3) 
$$\Theta = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha \Psi_H)^n} \right]^m$$

mit:

$\alpha$ : Van-Genuchten-Parameter [ $1 \text{ m}^{-1}$ ],

$m$ : Van-Genuchten-Parameter [ - ],

$n$ : Van-Genuchten-Parameter [ - ].

Die VAN GENUCHTEN-Parameter  $\alpha$ ,  $m$  und  $n$  haben keine physikalische Bedeutung. Sie wurden durch zahlreiche Untersuchungen an unterschiedlichen Bodenproben empirisch bestimmt (VAN GENUCHTEN, 1980).

Die meisten Sättigungsverläufe erlauben nach VAN GENUCHTEN (1980) die Einschränkung von Gleichung (3) durch:

$$(4) \quad m = 1 - 1/n$$

$\theta_s$  und  $\theta_r$  lassen sich direkt experimentell mittels pF-Methodik bestimmen. In der Gleichung 2 gibt es noch zwei unabhängige Parameter ( $\alpha$ ,  $n$ ). Bei sehr feinkörnigem Material sind die für die Bestimmung von  $\theta_r$  notwendigen hohen Saugspannungen im Labor schwer herzustellen. Deshalb kann es notwendig sein, die  $\Theta$ - $\Psi_m$ -Kurve in Richtung sehr niedriger Wassergehalte zu extrapolieren (VAN GENUCHTEN, 1980).

Bei einer Infiltration wird ein Zusammenspiel von beiden Porensystemen in Bewegung gesetzt. Die bestehenden Feuchtebedingungen im Boden sind entscheidend dafür, ob es zu einer Wasserbewegung in den Makroporen kommt. Außerdem spielt hier auch die Niederschlagsmenge und Niederschlagsintensität eine wichtige Rolle. Im Fall einer trockenen Bodenmatrix wird das Wasser, welches direkt in die Makroporen infiltriert, durch das hohe Saugpotential seitlich aus den Makroporen abgeführt. Umgekehrt wäre es, wenn das Wasser aus der gesättigten Matrix in die Makroporen einfließt. In diesem Fall ist ein positives Matrixpotential eine Voraussetzung. Dieses Zusammenspiel der Porensysteme macht die Bedeutung der Mikroporen deutlich, in dem sie das Wasser speichern und somit für unterschiedliche „Vorfeuchten“ sorgen (WETZEL, 2005). Niederschlagswasser, das in den Makroporen versickert, wird von der ungesättigten Matrix aufgenommen und perkoliert in größere Tiefen. Je mehr Makroporen in einem Substrat existieren, desto besser und mehr kann das Wasser infiltrieren. Die auf das Wasser wirkenden Kräfte der Bodenmatrix führen dazu, dass unter gesättigten Bedingungen nicht bindige Sedimente mit einem höheren Anteil an groben Poren eine höhere Wasserdurchlässigkeit aufweisen als bindige Sedimente mit hohem Anteil an Fein- und Mittelporen (CLAUSSEN ET AL., 2003).

Unter ungesättigten Bedingungen hängt die Wasserdurchlässigkeit somit von der Wasserspannung bzw. dem Wassergehalt ab (Wasserspannungs-Durchlässigkeitsfunktion  $k_{(\psi)}$ -Funktion bzw. Wassergehalts-Wasserspannungsfunktion  $\theta_{(\psi)}$ -Funktion). Im gesättigten Boden ist die Wasserdurchlässigkeit am größten ( $k_r$ -Wert). Je geringer der Was-

sergehalt des Bodens ist, desto weniger wassergefüllte kontinuierliche Abschnitte stehen dem Wassertransport zur Verfügung. Mit abnehmendem Wassergehalt des Bodens sinkt deswegen die ungesättigte Wasserleitfähigkeit ( $K_u$ -Wert) (CLAUSSEN ET AL., 2003).

Die Bestimmung der  $K_u$  - Funktion im Felde durch gleichzeitige Messung des Matrixpotentials und des Wassergehaltes war aus zeitlichen und finanziellen Gründen nicht möglich. Der Einsatz der TDR-Sonden zur Wassergehaltsbestimmung im Felde würde einen höheren messtechnischen und zeitlichen Aufwand erfordern und aufgrund des stationären Einbaus die Bodenbearbeitungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den langjährigen Feldversuchen behindern.

Die Wasserretentionskurve (pF-Kurve) und die hydraulische Leitfähigkeit ( $K_u$ ) wurden mit einem Messverfahren nach SCHINDLER (1980) ermittelt. Dazu wurde die „Apparatur pF- $K_u$  DT04-01“ genutzt (Abb. 10). Aufgrund von Kapazitätsgründen wurden 250 cm<sup>3</sup> Stechzylinder in 3-facher Wiederholung nur von ausgewählten Parzellen entnommen. Auswahlkriterium waren Ton- und  $C_t$ -Gehalte: Es wurden jeweils die 8 Parzellen mit den höchsten bzw. niedrigsten Werten beprobt (16 Parzellen mit 3-facher Wiederholung). In Kapitel 4, Tabelle 14 und Tabelle 15 sind diese Parzellen benannt.

Die Stechzylinder wurden vor der Messung vollständig aufgesättigt und anschließend abgedichtet. Die freie Oberfläche wurde der Verdunstung ausgesetzt, wobei der Gradient der entstehenden Wasserbewegung messtechnisch erfasst wurde. Die Stechzylinder wurden dazu auf einen sternförmigen Probenwechsler gesetzt und mit einem eingestellten Zeitintervall (20 Minuten oder 30 Minuten) periodisch über eine Waage geführt. Die im Zeitintervall durch die Probenoberfläche strömende Wassermenge (Wasserbewegung) wurde durch die Wägung ermittelt. Der Gradient der Wasserspannung wurde in jedem Stechzylinder durch 2 im Abstand von 3 cm eingebaute Tensiometer ermittelt. Die Tensiometerwerte wurden mit dem Zeittakt der Wägung erfasst. Die Versuchssteuerung und primäre Datenaufzeichnung führte ein integrierter Prozessrechner aus, da die Kommunikation mit dem Prozessrechner über einen PC erfolgte. Die eingebauten Tensiometer und das generelle Messverfahren erlauben eine Arbeit nur bis ca. pF 2,5. Für höhere Saugspannung wurde der sogenannte Drucktopf verwendet.



Abb. 10: pF –  $K_u$  Apparatur DT 04-01 der Firma UGT (Quelle: <http://ugt-online.de>)

Die Druckstufen 3,5, 3,8 und 4,2 pF wurden in einem Drucktopf mittels einer „15 Bar keramischen Platte“ mit 3-facher Wiederholung bestimmt. Aus der Trockenrohdichte und der Reindichte der festen Bodenbestandteile ( $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ ) wurden die entsprechenden Gesamtporenvolumina errechnet.

Die gemessenen Wertepaare sowohl für die Wasserretentionskurve als auch für die ungesättigte Wasserleitfähigkeit wurden mit der Software RETC (der Firma USDA-ARS U.S.) angepasst. RETC nutzt den oben erklärten VAN GENUCHTEN-Ansatz und fittet die einzelnen Punkte solange bis eine optimale Anpassung erreicht wird; das betrifft die geringsten Abweichungen zwischen den Messpunkten und der modellierten Kurve.

Aufgrund von Kapazitätsgründen wurden nur ausgewählte Parzellen mittels Stechzylinder für das pF- $K_u$ -Verfahren mit jeweils 3 Wiederholungen beprobt. In Dahlem betraf dies 8 Parzellen mit den höchsten  $C_{\text{org}}$ -Werten und 8 Parzellen mit den niedrigsten.

In Dedelow wurde ebenfalls dieser Ansatz gewählt; je Bodenbearbeitungsvariante wurden jeweils die höchste und die niedrigste Variante bezüglich des  $C_{\text{org}}$ -Gehaltes, insgesamt 16 Parzellen, gewählt.

### **3.4 Auswertungsmethoden**

Die statistische Auswertung erfolgte mittels Varianzanalyse entsprechend der Versuchsanlagen und anschließendem Mittelwertvergleich mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha \leq 0,05$  unter Nutzung „Prozedur MIXED“ mit SAS Version 9.2. für Berlin-Dahlem und das Türkische Statistikprogramm TARIST (Version Nummer 4.0, Serien Nummer A - 1001) für Dedelow. Die Auswertung der Substratschichtung beider Versuchsstandorte wurde mittels des Computerprogramms SURFER (Version 8, Golden Software) dargestellt.

## **4. Ergebnisse und Diskussion**

Nach langjährigen Untersuchungen zu verschiedenen Bodenbearbeitungssystemen auf unterschiedlichen Standorten in Berlin-Dahlem und Dedelow konnten deutliche Unterschiede in den bodenphysikalischen und –chemischen Eigenschaften festgestellt werden. Diese werden nachfolgend im Einzelnen beschrieben.

### **4.1 Standortparameter**

Die bodenphysikalischen und –chemischen Bodeneigenschaften sind wesentliche Parameter für die Beurteilung von landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit und das Pflanzenwachstum. In diesem Kapitel werden die ausgewählten bodenkundlichen und pflanzenbaulichen Parameter dargestellt.

#### **4.1.1 Substratschichtung**

Für das Pflanzenwachstum ist von großer Bedeutung, in welcher Tiefe des Bodens die Wurzeln die Geschiebesubstrate treffen, da die Unterschiede im Luft- und Wasserhaushalt der Horizonte eine Wirkung auf das Pflanzenwachstum haben. Derartige Standortheterogenitäten können die eigentliche Versuchsfrage in Dauerversuchen verfälschen und werden oft zu wenig beachtet.

Die Messungen der Substratmächtigkeiten im Mittelpunkt jeder Parzelle in Berlin-Dahlem zeigen, dass ein stark variierender Wechsel des Geschiebesandes und Geschiebelehms vorliegt (Abb. 11). Bei einer sehr geringen Neigung der Bodenoberfläche ergibt sich eine Decksandmächtigkeit zwischen 35 - 110 cm (Abb. 12). Die eigenen Ergebnisse bestätigen Angaben von KRZYSCH ET AL. (1992), die für den Bereich der Parzellen 9, 10, 11, 12, 33, 34, 35 und 36 von einer 60 cm mächtigen Decklage mit 70 % Sandanteil berichten.

Betrachtet man die Extreme der Decksandmächtigkeiten sowie die absolute Differenz (Tab. 10), so unterscheiden sich die farbig markierten Parzellen 19, 25, 42 und 43 besonders stark in der Lage des Substratwechsels. Decksandschichten von 110 cm

(P 42, P 43) bedingen einen stark abweichenden Bodenwasser- und -lufthaushalt im Vergleich zu einem Standort mit bis fast in die Krume reichendem Lehmsubstrat (P 25 mit nur 35 cm Decksandmächtigkeit). Diese Standortheterogenität in Berlin-Dahlem ist bei allen nachfolgenden Interpretationen der Boden- und Pflanzenparameter zu beachten.

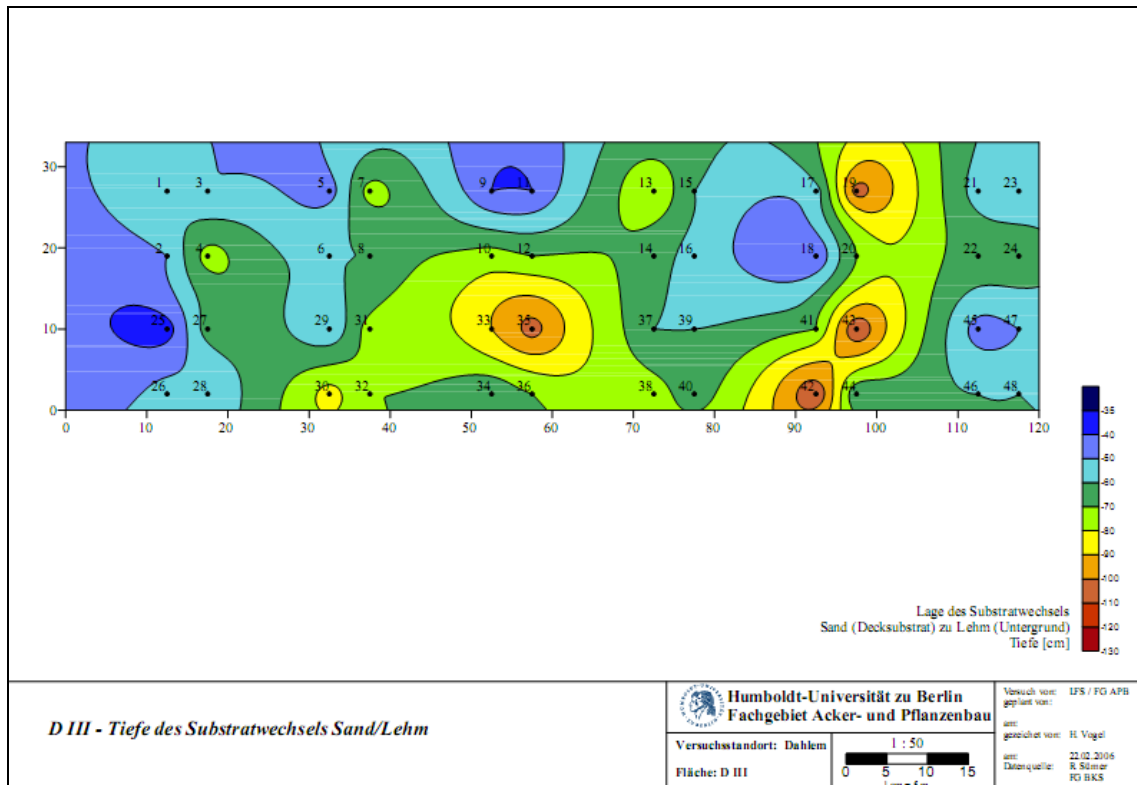


Abb. 11: Darstellung des Substratwechsels in Berlin-Dahlem (Grafische Darstellung, VOGEL, 2006)



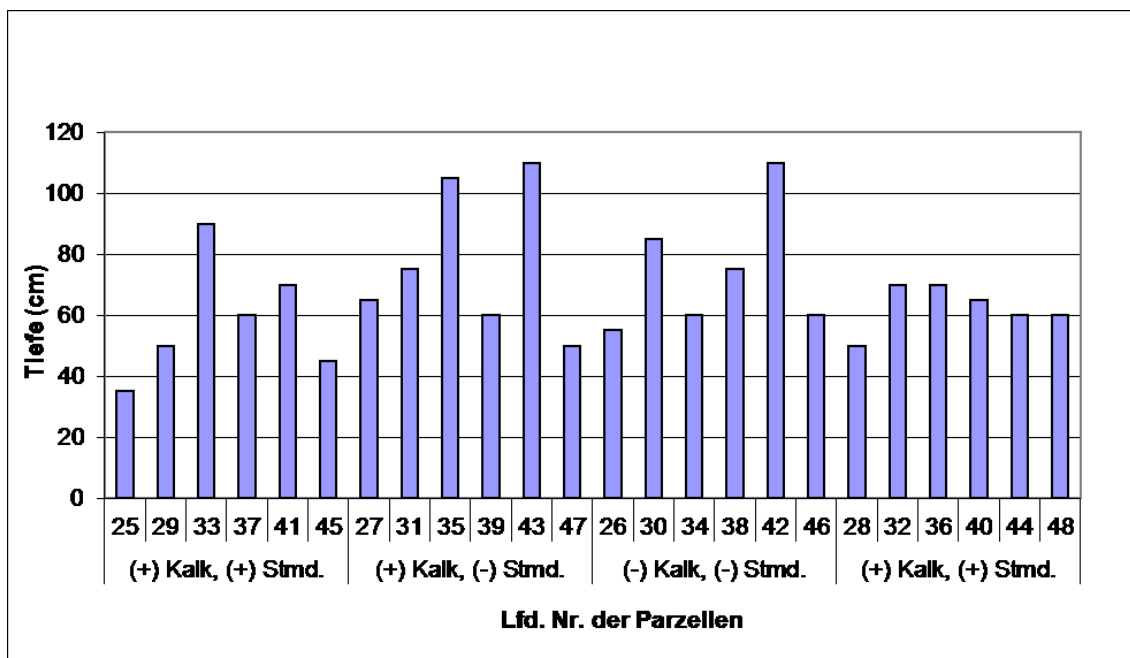
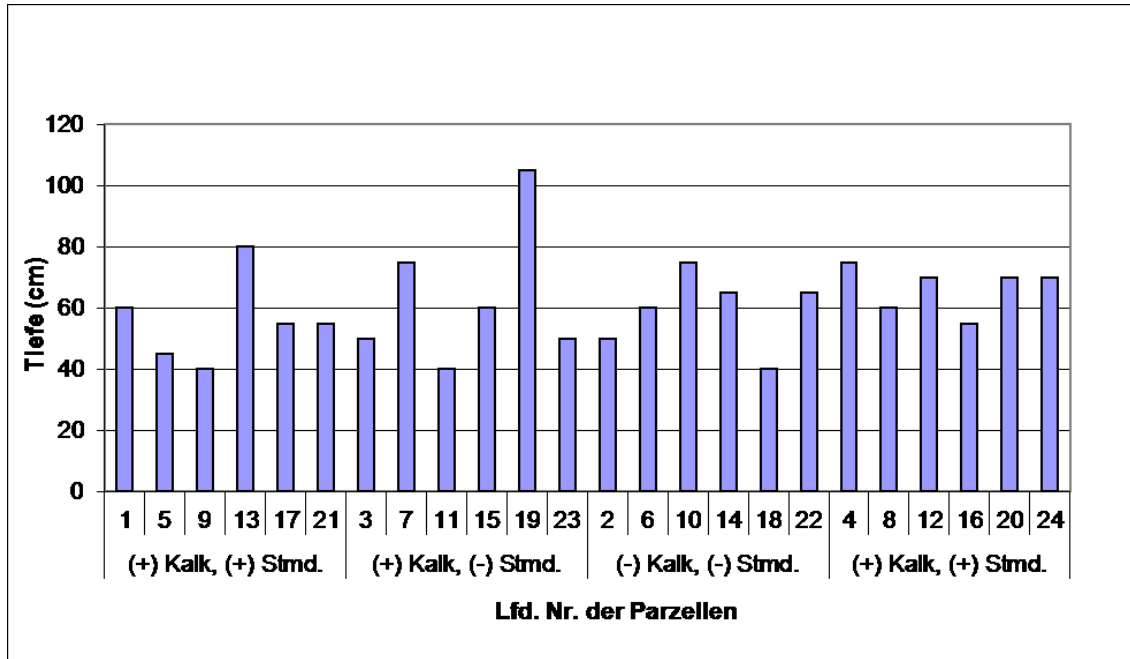


Abb. 12: Darstellung des Substratwechsels in flach (oben) und tief (unten) bearbeiteten Parzellen in Berlin-Dahlem

Tab. 10: Extreme der Decksandmächtigkeiten in der Versuchsanlage DIII in Berlin-Dahlem

Bodenbearbeitungstiefe	Prüfglieder	Minimale Decksandmächtigkeit (cm)	Maximale Decksandmächtigkeit (cm)	Absolute Differenz
flach	(+) Kalk, (+) Stmd.	40 (P 9)	80 (P 13)	40
	(+) Kalk, (-) Stmd.	40 (P 11)	105 (P 19)	65
	(-) Kalk, (+) Stmd.	40 (P 18)	75 (P 10)	35
	(-) Kalk, (-) Stmd.	55 (P 16)	75 (P 4)	20
tief	(+) Kalk, (+) Stmd.	35 (P 25)	90 (P 33)	55
	(+) Kalk, (-) Stmd.	50 (P 47)	110 (P 43)	60
	(-) Kalk, (+) Stmd.	55 (P 26)	110 (P 42)	55
	(-) Kalk, (-) Stmd.	50 (P 28)	70 (P 32)	20

Auf der Versuchsfläche Dedelow stellt sich der Wechsel des Geschiebesandes im Vergleich zu Berlin-Dahlem nicht so extrem dar (Abb. 13). Der Großteil dieser Versuchsfläche weist eine Decksandmächtigkeit von 55 cm bis 80 cm auf. Interessant ist der Verlauf bei der entsprechenden Direktsaat-Variante, wo der Sand in etwa der ersten und zweiten Wiederholung bis 90 cm und in der letzten Wiederholung bis 115 cm über Lehm bedeckt ist.

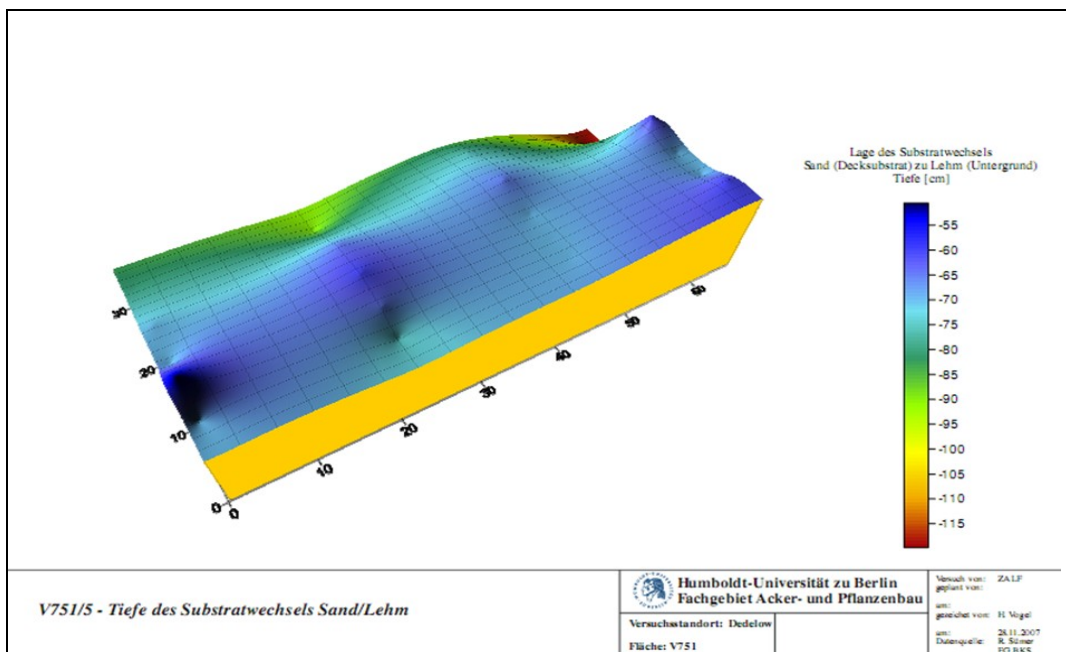


Abb. 13: Darstellung der Substratschichtung in der Versuchsanlage V751/5 in Dedelow (Grafische Darstellung, VOGEL, 2007)

### **4.1.2 Bodenarten**

Der untersuchte Oberboden aller 48 Parzellen in 10 - 15 cm Tiefe in der Versuchsanlage in Berlin-Dahlem besteht zu 72,9 % aus schwach lehmigem Sand (Sl2) und zu 27,1 % aus schwach schluffigem Sand (Su2) (siehe Anhang, Tab. A1 und Tab. A2). In 20 - 25 cm Bodentiefe besteht das Substrat in den 48 Parzellen zu 60,4 % aus Sl2, zu 37,5 % aus Su2 und 2,1 % aus Su3. Die Tongehalte der drei hauptsächlichen Bodenarten variieren zwischen 2,6 bis 8 M.-%.

Die Flächen in Dedelow sind im Vergleich zu Berlin-Dahlem durch einen tonreicheren Geschiebedecksand der Weichselvereisung gekennzeichnet (siehe Anhang, Tab. A3 und Tab. A4), der partiell bereits der Bodenartengruppe Sandlehme (nach KA5) zugeordnet werden kann. Die Tongehalte in 10 - 15 cm variieren über alle Varianten hinweg zwischen 4,5 und 13,4 M.-% und in 20 - 25 cm zwischen 3,6 und 21,8 M.-%. Der auffallend abweichende sehr hohe Tongehalt der Parzelle 4 kann nicht erklärt werden (Wiederholungen der Laboruntersuchungen ergaben vergleichbare Werte). Der Oberboden in 10 - 15 cm Tiefe in Dedelow wird zu jeweils 35 % durch die Bodenarten Su3 und Sl3 gekennzeichnet; fast dieselbe Situation besteht auch in der Bodentiefe 20 - 25 cm.

## **4.2 Bodenphysikalische Eigenschaften**

Zunächst werden im Ergebnisteil der bodenphysikalischen Eigenschaften der Durchdringungswiderstand, die Aggregatstabilität, die Wasserretention und die ungesättigte Wasserleitfähigkeit einzeln ausgewertet.

### **4.2.1 Durchdringungswiderstand**

Die Messungen mit dem Penetrologger zeigen die Festigkeit des Bodens in verschiedenen Tiefen auf. Der Durchdringungswiderstand ist sowohl von der Bodenart als auch vom Wassergehalt abhängig. Mit einem steigenden Wassergehalt reduziert sich der Durchdringungswiderstandswert bei gleichen Lagerungsdichten (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2010). Auch bei gleicher Lagerungsdichte mit sinkendem Wassergehalt kann es zur Erhöhung des Durchdringungswiderstandes kommen.

Unterschiede in den Korngrößenverhältnissen, im Humusgehalt und in der Aggregatstabilität führen zu differenzierten Absolutwerten der Normalverdichtung verschiedener

Bodenarten und –typen (EPPERLEIN, 2001). PETELKAU UND ROGASIK (1994) wiesen zur Einschätzung der Lockerungsbedürftigkeit krumennaher Unterböden auf ostdeutschen Moränenstandorten bei sandigen Böden auf einen Durchdringungswiderstand von 4,3 bis 4,8 N mm<sup>-2</sup> hin. Demgegenüber wurden bei sandigem Lehm und Lehm bzw. bei Bodenarten mit geringerem Sandanteil die Grenzbereiche zwischen 3,2 und 4,0 N mm<sup>-2</sup> festgelegt. Es kann daraus geschlussfolgert werden, dass unter gleichen Verhältnissen sandige Böden deutlich mehr verdichtbar sind.

Der Einfluss der langjährigen unterschiedlichen Bodenbearbeitung wird beispielhaft für die optimal versorgte Variante „mit Kalk- und mit Stallmistdüngung“ dargestellt (Abb. 14). Weitere Varianten sowie die gemittelte Grafik sind dem Anhang (Abb. A1) zu entnehmen. Die seit 1923 tief gepflügten Flächen (Prüffaktor A Pflugtiefe; Faktorstufe a1) haben im Durchschnitt einen um 1 MPa höheren Durchdringungswiderstand und diese dichtere Schicht befindet sich erwartungsgemäß tiefer als in der flachen Bodenbearbeitungsvariante. Obwohl in Berlin-Dahlem versuchstechnisch darauf geachtet wurde, sowohl bei standortgerechten Bodenfeuchten zu arbeiten als auch nur geringfügig schwere Technik einzusetzen, weisen beide Kurvenverläufe auf eine Pflugsohlenverdichtung hin.

Feinkartierungen aus den 90er Jahren zeigen, dass die Mächtigkeit des Ap-Horizontes im Laufe der Versuchsarbeiten zugenommen hat und bei der flach gepflügten Variante bei 22,6 cm (+/- 2,3 cm) und bei der tief gepflügten Variante bei 33,3 cm (+/- 2,8 cm) liegt (KRZYSCH ET AL., 1992). Somit ist der Boden bei der flachen Variante um fast 7 cm und bei der tiefen Variante um 8 cm tiefer technisch-mechanisch beeinflusst als zu Beginn der Versuchsanlage. Auch diese Standortveränderung ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten.

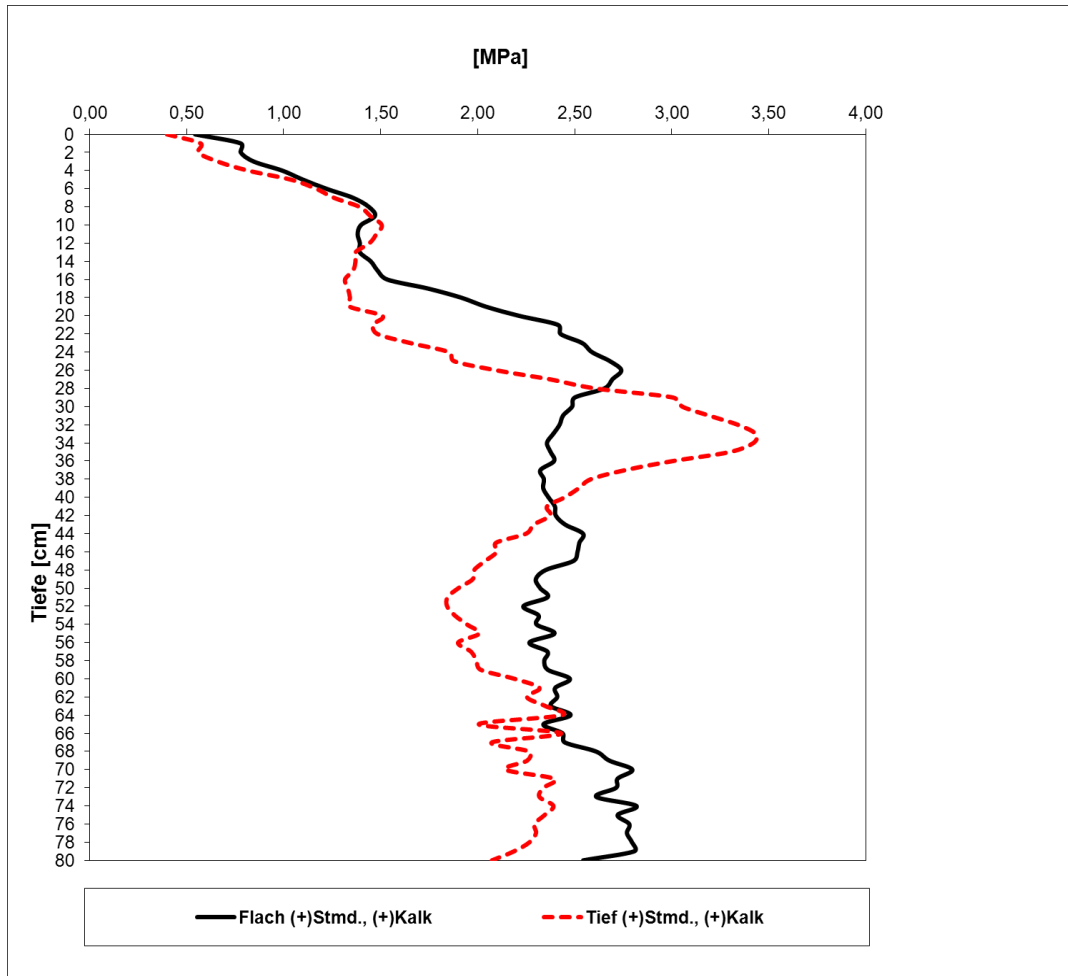


Abb. 14: Einfluss von verschiedenen Bodenbearbeitungstiefen auf den Durchdringungswiderstand in den optimal mit Kalk und Stallmist versorgten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, Frühjahr 2006)

Vergleicht man die verschiedenen Prüfglieder innerhalb der flach bearbeiteten Versuchsfläche in Berlin Dahlem, so zeigt sich in der durch Düngungsmaßnahmen beeinflussten Bodenschicht des Ap-Horizontes von 0 bis 17 cm, dass sowohl Stallmistdüngung als auch Kalk die Bodenstruktur positiv beeinflussen, da hier die geringsten Durchdringungswiderstände gemessen wurden (Abb. 15). Unterlassene Kalkung bedingte die höchsten Werte.

Im Krumenbasisbereich ist die Situation umgekehrt, was durch das verstärkte Befahren für das flächenhafte Ausbringen der Düngermengen hervorgerufen sein könnte; maximale Durchdringungswiderstände bis 3 MPa sind die Ergebnisse. Die Tiefenlage dieser höchsten Werte unterstreicht das oben Genannte über die langjährige Verlagerung der Pflugtiefe. Unterhalb der Krumenbasisverdichtung ist die Substratheterogenität Ursache für die Unterschiede der Prüfglieder.

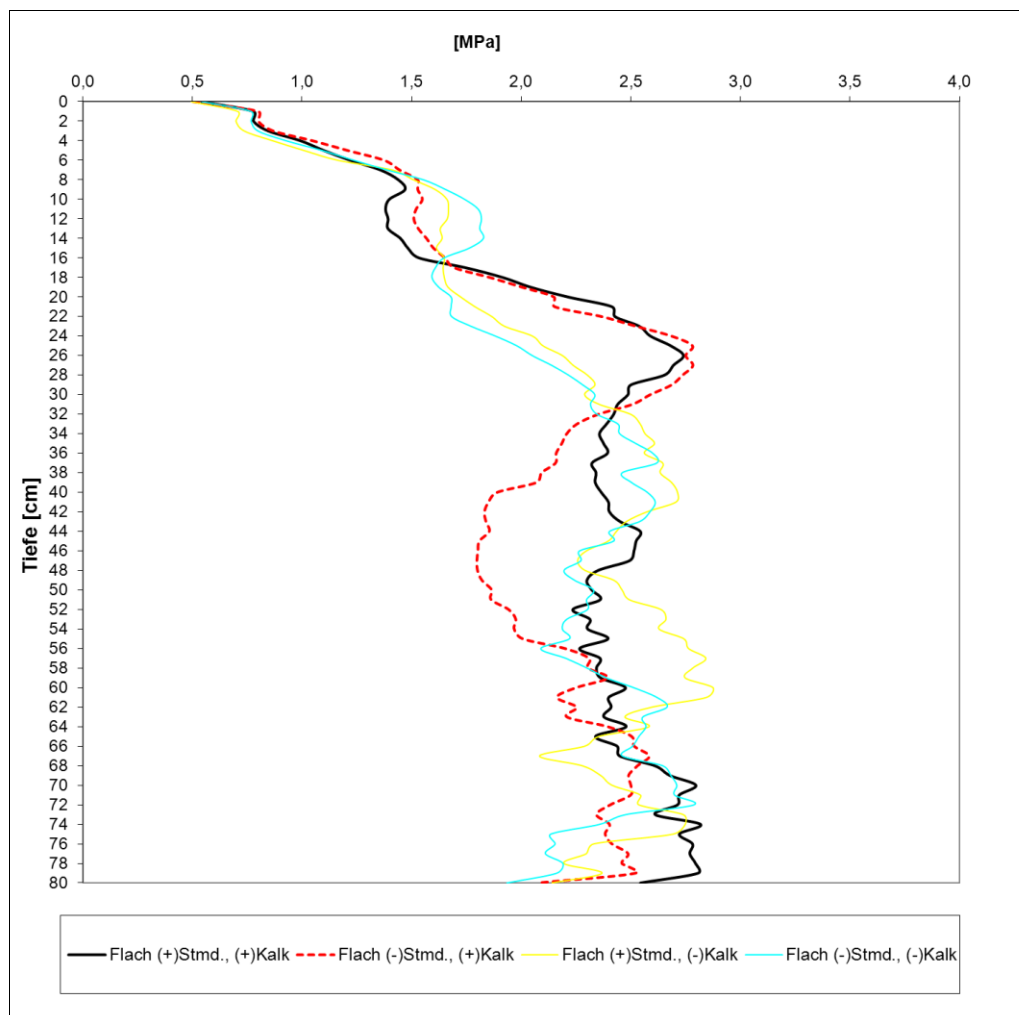


Abb. 15: Einfluss von Kalk- und Stallmistdüngung auf den Durchdringungswiderstand bei flacher Bodenbearbeitung (Berlin-Dahlem, Frühjahr 2006)

Die Durchdringungswiderstandsmessungen in den tief bearbeiteten Parzellen unterstreichen ebenfalls die Gefüge verbessernde Wirkung von Kalk und Stallmist (Abb. 16), wobei bis ca. 20 cm insbesondere die nicht mit Kalk versorgten Varianten höchste Werte zeigen. Auch der Maximalwert in der Krumenbasis wird durch die Variante „Kalk- und Stallmistdüngung“ erreicht. Tendenziell sind die DW-Werte der gekalkten und mit Stallmist gedüngten Varianten unterhalb der Krumenbasisverdichtung niedriger als die Vergleichsvarianten. Im Vergleich zur flachen Bodenbearbeitung sind die Unterschiede zwischen den Durchdringungswiderstandskurven geringer.

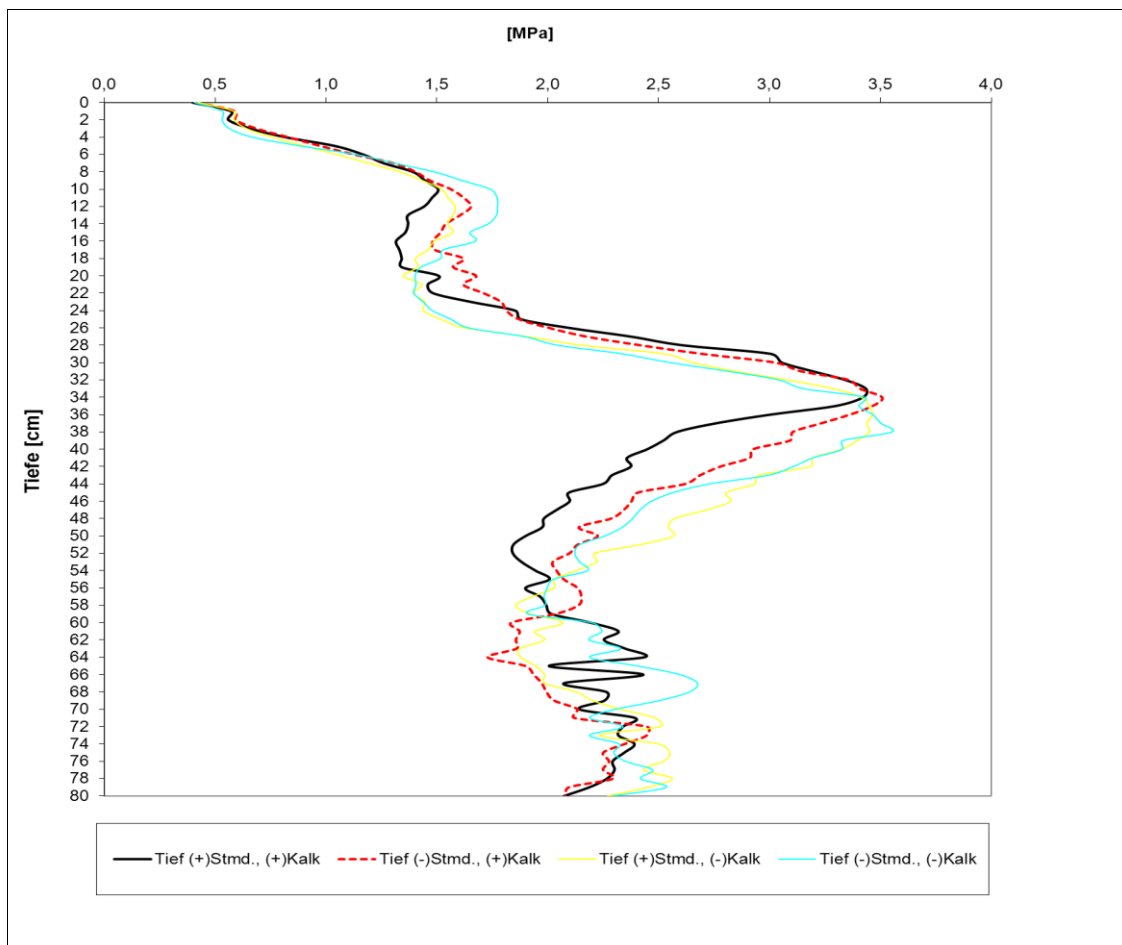


Abb. 16: Einfluss von Kalk- und Stallmistdüngung auf den Durchdringungswiderstand bei tiefer Bodenbearbeitung (Berlin-Dahlem, Frühjahr 2006)

Die Untersuchungen zum Durchdringungswiderstand auf der Versuchsfläche Dedelow zeigen deutliche Unterschiede der verschiedenen Bodenbearbeitungsvarianten (Abb. 17). Der Kurvenverlauf der Variante „Grubber 15 cm“ ist nicht zu erklären und bleibt nachfolgend unberücksichtigt. Sehr gut erkennbar ist die Bodendichteveränderung unter Direktsaat mit maximalen DW-Werten in den obersten 15 cm. Beide Pflugvarianten bedingen die geringsten DW-Werte in der o.g. Schicht und die Messwerte bilden sehr genau die jeweilige Bearbeitungstiefe ab. Ausgeprägte Krumenbasisverdichtungen, wie in den Kurvenverläufen von Berlin-Dahlem ersichtlich, sind in Dedelow nicht zu finden; Ursache könnte das etwas lehmigere Substrat und somit eine etwas höhere Bodenfeuchte zum Zeitpunkt der Messung bei Feldkapazität als auch die kürzere Versuchszeit sein.

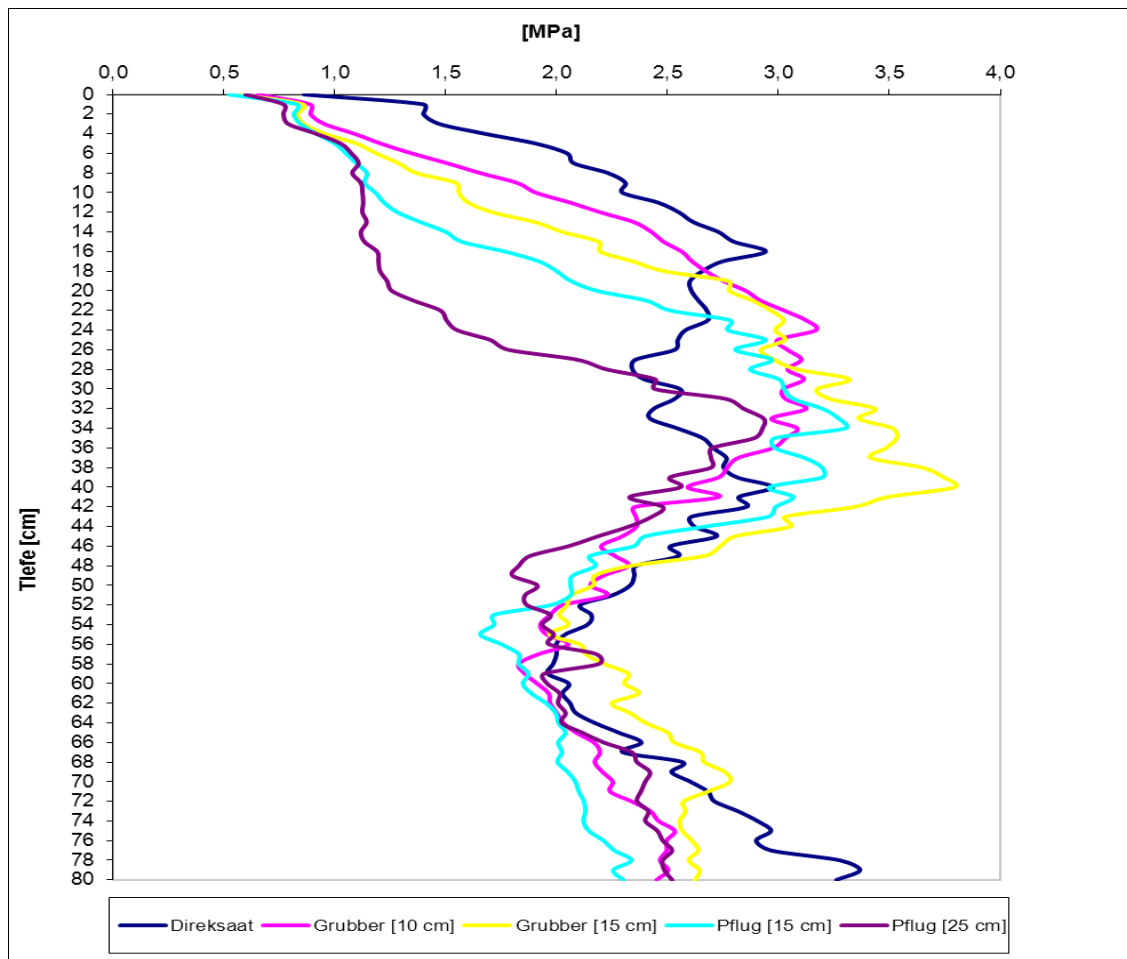


Abb. 17: Einfluss verschiedener Bodenbearbeitungsvarianten auf den Durchdringungswiderstand im Feldversuch V751/5 in Dedelow (Frühjahr 2007)

#### 4.2.2 Aggregatstabilität

Die Aggregatstabilität der bearbeiteten Oberböden in Berlin-Dahlem ist generell in den flach bearbeiteten Varianten höher als in den tief gepflügten Varianten, wobei in 5 von 8 Vergleichen eine Signifikanz nachweisbar ist. Besonders gut ist das in der Schicht 10 - 15 cm erkennbar (Tab. 11).



Tab. 11: Aggregatstabilität (%) in 10 - 15 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	18,76 d	13,30 ab
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	15,51 bc	13,32 ab
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	18,03 cd	13,06 ab
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	15,41 bc	11,62 a
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = 5%)= 3,05		

Innerhalb der flachen Variante zeigten sich in den Parzellen, die mit Kalk gedüngt wurden, keine Unterschiede in 10 - 15 cm im Vergleich zu den ungedüngten Parzellen. Auch in der tiefen Bodenbearbeitung wirkte sich die Kalkdüngung gering aus. Die mit Stallmist gedüngten Parzellen zeigten signifikant höhere Aggregatstabilitätswerte im Bodenbereich von 10 - 15 cm Tiefe im Vergleich zu den unterlassenen Stallmistdünger-Parzellen bei flacher Bodenbearbeitung. Unter tiefer Bodenbearbeitung weist die ungedüngte Variante geringste und statistisch gesicherte Aggregatstabilitätswerte auf.

In der Tiefe von 20 - 25 cm sind die Unterschiede gering und überwiegend nicht signifikant (Tab.12). Nur bei den ungekalkten Varianten haben die flach gepflügten Flächen signifikant höhere Aggregatstabilitätswerte als die tief gepflügten Flächen.

Tab. 12: Aggregatstabilität (%) in 20 - 25 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+)Stallmistdüngung	15,61 bc	13,05 ab
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	15,61 bc	13,24 ab
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	16,15 c	13,14 ab
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	17,60 c	12,71 a
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = 5%)= 2,89		

Unter den Standortbedingungen in Dedelow konnten sehr viel größere Werte der Aggregatstabilität gemessen werden (Tab.13).

Tab. 13: Aggregatstabilität (%) in verschiedenen Bodentiefen der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten (Dedelow, 2007)

Bodenbearbeitungs-varianten	Aggregatstabilität (%)	
	10-15 cm	20-25 cm
Direktsaat	24,03 a	27,80 ab
Grubber (10 cm)	28,30 a	35,30 a
Grubber (15 cm)	24,03 a	27,93 ab
Pflug (15 cm)	23,23 a	25,67 b
Pflug (25 cm)	20,67 a	21,10 b
LSD <sub>A*B+C</sub> ( $\alpha=5\%$ )	8,40	7,57

Auffallend sind die durchgängig höheren Aggregatstabilitätswerte in der tieferen Bodenschicht. Die größte Aggregatstabilität zeigte in beiden Beprobungstiefen die Grubbervariante 10 cm, die geringste die tief gepflügten Flächen.

#### 4.2.3 Wasserretention und ungesättigte Wasserleitfähigkeit

Böden enthalten unter natürlichen Bedingungen stets Wasser und stellen daher den wichtigsten temporären Wasserspeicher für das Pflanzenwachstum dar. Das durch Niederschläge dem Boden zugeführte Wasser wird zu einem Teil in den Poren entgegen der Schwerkraft festgehalten und zum anderen als Sickerwasser in tiefere Bodenbereiche verlagert (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2010). Eines der wichtigsten Ziele der Landwirtschaft auf leichten Böden bzw. sandigen Böden ist es, den Wasserhaushalt dieser Böden zu verbessern.

Für die Ermittlung und Verteilung des Anteils der wasserspeichernden Poren in Böden wird die Wasserretentionsfunktion (pF-Funktion) verwendet (siehe auch Kapitel 3). Die Wasserleitfähigkeit wird im Wesentlichen durch die Anzahl, die Größe und die Form der im Boden vorhandenen Poren bestimmt. Transportvorgänge des Bodenwassers können im wassergesättigten Zustand des Bodens mit dem  $k_f$ -Wert gekennzeichnet werden. Da Böden jedoch meist nicht in diesem Zustand angetroffen werden, ist es von großer Bedeutung, den Wassertransport auch im ungesättigten Zustand zu beschreiben.

In der folgenden Tabelle (Tab. 14) werden die ausgewählten 16 Parzellen des Feldversuchs in Berlin-Dahlem je nach den höchsten und niedrigsten  $C_{org}$ -Gehalten in

10 - 15 cm Bodentiefe und deren gemessenen und angepassten Wassergehalte in Volumen-% (Gesamtporenvolumen, Feldkapazität, Permanenter Welkepunkt und nutzbare Feldkapazität) und deren Tongehalte (%) dargestellt.

Der höchste  $C_{org}$ -Gehalt mit 1,26 % entspricht der Parzelle Nr. 13 unter dem Prüfglied „mit Kalk- und mit Stallmistdüngung“ in der 10 - 15 cm Bodentiefe. Die Feldkapazität und die nutzbare Feldkapazität dieser Parzelle betragen 27,4 Vol.-% und 25,7 Vol.-%. Im Vergleich zur Parzelle mit dem geringsten  $C_{org}$ -Gehalt (0,49 %) weist sie somit um 3,8 Vol.-% und um 4,1 Vol.-% höhere Werte auf. Der höchste Wert der Feld- und nutzbaren Feldkapazität beträgt jedoch 31,1 Vol.-% und 29,0 Vol.-% und lässt sich zum mittleren Bereich der  $C_{org}$ -Gehalt-Parzellen mit 1,02 % einstufen (Parzellen Nr. 10, Prüfglied flache Bodenbearbeitung „ohne Kalk- und mit Stallmistdüngung“). Die niedrigste Feldkapazität und nutzbare Feldkapazität zeigt sich wiederum in der minimalen  $C_{org}$ -Gehalt-Parzelle mit 23,6 Vol.-% und 21,6 Vol.-%. Eine Verallgemeinerung der Feld- und nutzbaren Feldkapazitäten je nach den  $C_{org}$ -Gehaltsstufen in 10 - 15 cm Bodentiefe ist hier schwer abzuschätzen.

In 20 - 25 cm Bodentiefe lassen sich die  $C_{org}$ -Gehalte nicht nach der Größe analog zur 10 - 15 cm Bodentiefe einstufen, weil die höchsten und die niedrigsten  $C_{org}$ -Gehalt-Parzellen ausschließlich je nach Bestimmung der 10 - 15 cm Bodentiefen ausgewählt worden sind (Tab. 15). Trotzdem kann verallgemeinert werden, dass die  $C_{org}$ -Gehalte je nach den Parzellennummern vom oberen flachen bis zum unteren tiefen Prüfglied sich tendenziell reduzieren. Im Gegenteil zur 10 - 15 cm Bodentiefe befindet sich der Höchstwert der Feldkapazität und der nutzbaren Feldkapazität mit 0,59 %  $C_{org}$ -Gehalt in der tiefen Variante unter dem Prüfglied „ohne Kalk- und ohne Stallmistdüngung“ (Parzelle Nr. 32). Jedoch befinden sich annähernd gleiche Feld- und nutzbare Feldkapazitätswerte bei höheren (Parzellen Nr. 6 und 7) und auch bei der niedrigeren  $C_{org}$ -Gehalt-Parzelle (Parzelle Nr. 44) bei flachen und tiefen Bodenbearbeitungen. Obwohl der niedrigste Feldkapazitätsanteil sich in der tiefen Variante unter dem Prüfglied „mit Kalk- und ohne Stallmistdüngung“ (Parzelle Nr. 47) mit 22,6 Vol.-% befindet, weisen annähernd gleiche Feld- und nutzbare Feldkapazitätswerte in einer höheren  $C_{org}$ -Gehalt-Parzelle mit 22,7 Vol.-% und 20,2 Vol.-% auf (Parzelle Nr. 9). Eine generelle Aussage über die Feld- und nutzbare Feldkapazitätswerte je nach Verlauf der  $C_{org}$ -Gehalte ist hier wiederum schwer abzuschätzen. In beiden Tabellen ist erkennbar, dass die gemessenen und die angepassten Wassergehaltswerte (Vol.-%) gut übereinstimmen.

Tab. 14: Gemessene und angepasste Wassergehaltswerte (Vol.-%) in Abhängigkeit der ausgewählten C<sub>org</sub>-Gehalt (%) – Parzellen in 10 - 15 cm Bodentiefe der untersuchten Prüfglieder (Berlin-Dahlem, 2006)

Parzellen Nr.	Prüfglieder		Ton (%)	Bodenart	C <sub>org</sub> (%)	Wassergehalt in Volumen- %							
						GPV (%)		FK (1,8 pF)		PWP (4,2 pF)		nFK (1,8-4,2 pF)	
						<i>gemessen</i>	<i>angepasst</i>	<i>gemessen</i>	<i>angepasst</i>	<i>gemessen</i>	<i>angepasst</i>	<i>gemessen</i>	<i>angepasst</i>
13	flach	mit Kalk, mit Stmd.	2,6	SU2	1,26	38,9	34,7	27,4	27,3	1,7	2,5	25,7	24,8
5	flach	mit Kalk, mit Stmd.	5,4	SL2	1,16	37,4	36,1	30,5	30,6	6,1	7,0	24,4	23,6
2	flach	ohne Kalk, mit Stmd.	6,0	SL2	1,11	36,6	33,9	28,1	27,7	3,0	4,2	25,1	23,5
9	flach	mit Kalk, mit Stmd.	5,8	SL2	1,05	36,6	38,0	28,4	28,4	2,4	2,3	26,0	26,1
6	flach	ohne Kalk, mit Stmd.	7,5	SL2	1,04	36,2	33,8	28,9	29,4	3,8	3,1	25,1	26,3
7	flach	mit Kalk, ohne Stmd.	6,5	SL2	1,02	34,3	35,0	29,9	28,6	5,4	3,9	24,5	24,7
10	flach	ohne Kalk, mit Stmd.	6,4	SL2	1,02	38,5	38,8	31,1	30,0	2,1	1,2	29,0	28,8
1	flach	mit Kalk, mit Stmd.	5,4	SL2	0,95	35,5	34,8	27,7	26,4	3,7	3,6	24,0	22,8
39	tief	mit Kalk, ohne Stmd.	5,7	SL2	0,60	31,7	29,9	24,9	25,6	1,7	2,1	23,2	23,5
32	tief	ohne Kalk, ohne Stmd.	5,3	SL2	0,57	34,0	34,5	26,9	26,0	2,3	1,4	24,6	24,6
23	flach	mit Kalk, ohne Stmd.	5,3	SL2	0,55	40,8	39,3	26,6	26,5	1,6	1,6	25,0	24,9
47	tief	mit Kalk, ohne Stmd.	6,0	SL2	0,53	33,2	33,0	24,2	23,6	1,9	2,3	22,3	21,3
44	tief	ohne Kalk, ohne Stmd.	6,0	SL2	0,53	33,6	34,3	25,4	24,8	2,7	3,0	22,7	21,8
40	tief	ohne Kalk, ohne Stmd.	4,8	SU2	0,52	35,1	35,9	26,3	25,5	2,0	2,0	24,3	23,5
48	tief	ohne Kalk, ohne Stmd.	5,7	SL2	0,50	29,4	31,1	26,8	23,8	1,5	1,6	25,3	22,2
46	tief	ohne Kalk, mit Stmd.	6,0	SL2	0,49	34,0	34,6	23,6	23,4	2,0	1,8	21,6	21,6

Tab. 15: Gemessene und angepasste Wassergehaltswerte (Vol.-%) in Abhängigkeit der ausgewählten C<sub>org</sub>-Gehalt (%) – Parzellen in 20 - 25 cm Bodentiefe der untersuchten Prüfglieder (Berlin-Dahlem, 2006)

Pazellen Nr.	Prüfglieder		Ton (%)	Bodenart	C <sub>org</sub> (%)	Wassergehalt in Volumen %							
						GPV (%)		FK (1,8 pF)		PWP (4,2 pF)		nFK (1,8-4,2 pF)	
						<i>gemessen</i>	<i>angepasst</i>	<i>gemessen</i>	<i>angepasst</i>	<i>gemessen</i>	<i>angepasst</i>	<i>gemessen</i>	<i>angepasst</i>
13	flach	mit Kalk, mit Stmd.	6,6	SL2	0,94	39,2	32,9	25,2	23,9	1,7	3,5	23,5	20,4
5	flach	mit Kalk, mit Stmd.	7,9	SL2	0,96	33,2	32,6	28,0	27,0	6,9	6,3	21,1	20,7
2	flach	ohne Kalk, mit Stmd.	5,1	SL2	0,73	30,6	29,6	26,8	26,3	1,7	1,8	25,1	24,5
9	flach	mit Kalk, mit Stmd.	5,2	SL2	0,75	35,8	34,4	22,7	20,9	2,5	3,5	20,2	17,4
6	flach	ohne Kalk, mit Stmd.	4,4	SU2	0,50	31,3	30,9	28,4	27,1	1,8	2,2	26,6	24,9
7	flach	mit Kalk, ohne Stmd.	6,3	SL2	0,76	35,8	34,8	28,5	27,0	5,5	4,8	23,0	22,2
10	flach	ohne Kalk, mit Stmd.	6,4	SL2	0,60	34,7	33,2	24,9	24,1	1,6	2,4	23,3	21,7
1	flach	mit Kalk, mit Stmd.	2,8	SU2	0,56	38,1	35,4	28,1	26,7	1,3	2,2	26,8	24,5
39	tief	mit Kalk, ohne Stmd.	5,4	SL2	0,60	40,0	38,9	25,5	24,3	1,3	3,2	24,2	21,1
32	tief	ohne Kalk, ohne Stmd.	7,7	SL2	0,59	36,2	36,9	28,6	27,4	1,9	1,5	26,7	25,9
23	flach	mit Kalk, ohne Stmd.	3,5	SU2	0,55	38,1	36,9	24,2	23,9	1,4	2,7	22,8	21,2
47	tief	mit Kalk, ohne Stmd.	5,3	SL2	0,51	36,2	34,6	22,6	22,7	1,8	2,8	20,8	19,9
44	tief	ohne Kalk, ohne Stmd.	5,7	SL2	0,50	35,8	37,7	28,4	26,8	2,5	2,9	26,0	23,9
40	tief	ohne Kalk, ohne Stmd.	5,0	SL2	0,49	38,9	38,7	24,1	24,5	1,4	1,9	22,7	22,6
48	tief	ohne Kalk, ohne Stmd.	4,6	SU2	0,45	36,2	35,5	24,5	23,2	1,2	1,8	23,3	21,4
46	tief	ohne Kalk, mit Stmd.	6,0	SL2	0,50	37,7	37,0	24,9	24,6	1,6	1,8	23,3	22,8

In den nächsten Tabellen (Tab. 16 und Tab. 17) werden unter Berücksichtigung jeweils verschiedener Bodenbearbeitungsvarianten in den verschiedenen  $C_{\text{org}}$ -Gehalt-Parzellen bzw. in den niedrigsten und höchsten  $C_{\text{org}}$ -Gehalt-Parzellen die im Labor gemessenen und die angepassten Wassergehalte in Vol.-% und die Tongehalte (%) dargestellt. In der Direktsaat-Variante konnten aus verschiedenen Gründen für den permanenten Welkepunkt (PWP) und für die nutzbare Feldkapazität (nFK) die Wassergehaltsmengen (Vol.-%) und in der Grubber-Variante für die maximalen  $C_{\text{org}}$ -Gehalt-Parzelle dieselben Wassergehaltsmengen nicht festgestellt werden. Auch in der 20 - 25 cm Bodentiefe in der Pflug-Variante (25 cm) konnten aus analogen Gründen nicht dieselben Wassergehaltsmengen festgestellt werden.

In der Direktsaat-Variante in 10 - 15 cm Bodentiefe (Tab. 16) lassen sich die  $C_{\text{org}}$ -Gehalt-Parzellen nicht stark voneinander differenzieren. Die angepassten nutzbaren Feldkapazitätswerte dieser Variante betragen 24,0 Vol.-% und 23,4 Vol.-%. Ähnliche Werte spiegeln sich in der Grubber-Variante (10 cm) wider. Die angepassten nutzbaren Feldkapazitätswerte für die maximale  $C_{\text{org}}$ -Gehalt-Parzelle (0,85 %) beträgt 25,1 Vol.-% und für die minimale  $C_{\text{org}}$ -Gehalt-Parzelle (0,65 %) 24,3 Vol.-% für die Grubber-Variante (10 cm). Auch in der Grubber-Variante (15 cm) sind ähnliche Werte zu entnehmen. In der Pflug-Variante (15 cm) weisen die Wassergehaltsmengen bezüglich der höheren  $C_{\text{org}}$ -Gehalte auch höhere Wassergehalte auf. Für die minimale  $C_{\text{org}}$ -Gehalt-Parzelle mit 0,73 % beträgt der gemessene nutzbare Feldkapazitätswert 28,7 Vol.-% und für die maximale  $C_{\text{org}}$ -Gehalt-Parzelle (0,87 %) 29,5 Vol.-%, welche auch gleichzeitig dem Höchstwert im Vergleich zu allen anderen Varianten entspricht. In der Pflug-Variante (25 cm) lassen sich annähernd die gleichen Wassergehaltsmengen analog zur Pflug-Variante (15 cm) sehen.

In 20 - 25 cm Bodentiefe spiegelt sich kein ähnliches Bild wie in der 10 - 15 cm Bodentiefe in Dedelow wider. Die entsprechenden Feldkapazitäts- und nutzbare Feldkapazitätswerte liegen annähernd auf dem gleichen Niveau (25,0 - 32,6 Vol.-% Feldkapazität und 22,7 – 28,7 Vol.-% nutzbare Feldkapazität) mit Ausnahme der Pflug-Variante (25 cm) in der maximalen  $C_{\text{org}}$ -Gehalt-Parzelle. In dieser Parzelle liegt die Feldkapazität und die nutzbare Feldkapazität auf einem Höchstwert von 34,2 Vol.-% und 32,6 Vol.-%. Auch in diesen beiden Tabellen ist erkennbar, dass die gemessenen und die angepassten Wassergehaltswerte (Vol.-%) gut übereinstimmen.

Tab. 16: Gemessene und angepasste Wassergehaltswerte (Volumen-%) in Abhängigkeit der ausgewählten C<sub>org</sub>-Gehalt (%) – Parzellen in 10 - 15 cm Bodentiefe der untersuchten Varianten (Dedelow, 2007)

Boden- bearbeitungs- Variante	Parzellen Nr.	Ton (%)	Bodenart	C <sub>org</sub> (%)	Wassergehalt in Volumen - %							
					GPV (%)		FK (1,8 pF)		PWP (4,2 pF)		nFK (1,8-4,2 pF)	
					gemessen	angepasst	gemessen	angepasst	gemessen	angepasst	gemessen	angepasst
Direktsaat	2	8,6 (min)	SI3	0,58 (min)	35,0	36,8	27,5	27,8	----	3,8	----	24,0
Direktsaat	4	13,4 (max)	SI4	0,66 (max)	35,1	33,6	29,1	28,5	----	5,2	----	23,4
Grubber (10 cm)	5	8,9 (max)	SI3	0,85 (max)	43,0	42,1	28,2	28,9	----	3,8	----	25,1
Grubber (10 cm)	6	7,2	SI2	0,65 (min)	38,1	37,2	28,6	27,8	3,7	3,5	24,9	24,3
Grubber (10 cm)	7	6,5 (min)	Su3	0,70	41,9	40,5	29,4	28,3	3,9	4,5	25,5	23,8
Grubber (10 cm)	8	8,1	SI3	0,73	34,7	33,7	28,1	27,5	5,7	4,5	22,4	23,0
Grubber (15 cm)	9	8,1 (max)	SI3	0,78 (max)	36,6	35,6	28,9	28,7	4,8	4,0	24,1	24,7
Grubber (15 cm)	11	7,2 (min)	SI2	0,70 (min)	40,4	38,0	29,8	29,0	4,0	3,3	25,8	25,7
Grubber (15 cm)	12	7,6	Su3	0,74	37,7	36,9	29,8	30,1	3,6	3,4	26,2	26,7
Pflug (15 cm)	13	7,9 (max)	Su3	0,81	35,5	35,0	30,3	30,3	3,4	3,9	26,9	26,4
Pflug (15 cm)	15	5,3 (min)	SI2	0,73 (min)	35,0	35,8	31,8	30,7	3,1	2,6	28,7	28,1
Pflug (15 cm)	16	5,4	Su3	0,87 (max)	43,4	40,8	32,7	32,9	3,2	4,1	29,5	28,8
Pflug (25 cm)	17	8,2 (max)	SI3	0,71	36,6	34,7	28,9	29,4	3,8	4,2	25,1	25,2
Pflug (25 cm)	18	5,3	Su3	0,69 (min)	40,4	36,7	29,6	30,3	3,1	4,1	26,5	26,2
Pflug (25 cm)	19	5,4	SI2	0,72	35,1	34,6	28,7	28,3	3,1	4,2	25,6	24,1
Pflug (25 cm)	20	4,5 (min)	Su2	0,81 (max)	37,4	35,3	31,1	31,3	2,2	3,2	28,9	28,1

Tab. 17: Gemessene und angepasste Wassergehaltswerte (Volumen-%) in Abhängigkeit der ausgewählten C<sub>org</sub>-Gehalt (%) – Parzellen in 20 - 25 cm Bodentiefe der untersuchten Varianten (Dedelow, 2007)

Boden- Bearbeitungs- Variante	Parzellen Nr.	Ton (%)	Bodenart	C <sub>org</sub> (%)	Wassergehalt in Volumen - %							
					GPV (%)		FK (1,8 pF)		PWP (4,2 pF)		nFK (1,8-4,2 pF)	
					<i>gemessen</i>	<i>angepasst</i>	<i>gemessen</i>	<i>angepasst</i>	<i>gemessen</i>	<i>angepasst</i>	<i>gemessen</i>	<i>angepasst</i>
Direktsaat	2	8,8 (min)	SI3	0,5 (min)	43,4	41,4	28,24	27,2	1,7	4,3	26,5	22,9
Direktsaat	4	21,8 (max)	SI4	0,6 (max)	40,0	38,7	32,6	33,2	3,9	4,7	28,7	28,5
Grubber (10 cm)	5	6,4 (min)	Su3	0,74 (max)	41,9	40,1	28,5	27,0	3,0	2,8	25,5	24,2
Grubber (10 cm)	6	7,4	SI2	0,55	31,7	31,7	26,3	26,2	3,4	2,3	22,9	23,9
Grubber (10 cm)	7	7,0	Su3	0,49 (min)	38,5	36,5	27,5	26,9	3,1	2,6	24,4	24,3
Grubber (10 cm)	8	9,1 (max)	SI3	0,55	38,1	34,9	28,1	27,7	2,8	2,2	25,3	25,5
Grubber (15 cm)	9	7,5	SI2	0,63 (max)	35,8	34,6	29,3	29,0	2,6	1,8	26,7	27,2
Grubber (15 cm)	11	6,7 (min)	Su3	0,54 (min)	39,6	37,1	25,0	24,7	2,3	3,8	22,7	20,9
Grubber (15 cm)	12	8,1 (max)	SI3	0,59	35,8	34,1	29,1	29,3	3,6	3,1	25,5	26,2
Pflug (15 cm)	13	8,2 (max)	SI3	0,64 (max)	34,7	32,9	27,8	28,5	2,3	2,0	25,5	26,5
Pflug (15 cm)	15	4,6 (min)	Su2	0,57	38,1	37,0	30,1	30,6	2,0	1,5	28,1	29,1
Pflug (15 cm)	16	5,3	Su3	0,54 (min)	40,4	38,9	30,2	30,6	3,2	3,9	27,0	26,7
Pflug (25 cm)	17	12,0 (max)	SI4	0,42 (min)	35,8	32,3	27,5	29,0	----	2,3	----	26,7
Pflug (25 cm)	18	6,6	SI2	0,54	42,3	41,2	28,4	27,4	----	2,9	----	24,5
Pflug (25 cm)	19	3,6 (min)	Su3	0,68	39,2	33,6	27,9	28,8	2,6	3,4	25,3	25,4
Pflug (25 cm)	20	5,7	Su3	0,71 (max)	37,0	36,3	34,2	34,1	2,4	1,5	31,8	32,6



Der Einfluss der langjährigen unterschiedlichen Bodenbearbeitung auf die Wasserspeicherkapazität und die hydraulischen Eigenschaften wird nachfolgend beispielhaft für die Parzellen mit den jeweils höchsten und niedrigsten  $C_{org}$ -Gehalten der flachen und tiefen Variante in Dahlem dargestellt; für Dedelow wurde analog für alle Bodenbearbeitungsverfahren vorgegangen. Weitere Varianten für die pF-Kurven und die ungesättigte Wasserleitfähigkeit sind dem Anhang (Abb. A2 bis Abb. A11) zu entnehmen.

In Abb. 18 sind für die flache Bodenbearbeitung die Parzellen mit dem höchsten und niedrigsten  $C_{org}$ -Gehalt in jeweils 10 - 15 cm und in 20 - 25 cm dargestellt (1,26 % und 0,94 %  $C_{org}$  in 10 - 15 cm Tiefe sowie 0,95 und 0,56 %  $C_{org}$  in 20 - 25 cm Tiefe). Für den untersuchten Faktor "mit Kalk und mit Stallmistdüngung" sind für die zwei Bodenschichten die Laborwerte, die pF-Funktionen als Einzelwerte sowie die gefitteten Funktionen angegeben.

Die pF-Kurven der Parzelle mit dem höchsten  $C_{org}$ -Gehalt zeigen zwischen pF 1,8 und 4,2 pF (nutzbare Feldkapazität) in beiden Tiefen (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) mit 25,7 % und 23,5 % einen ähnlichen Verlauf (Abb. 18).

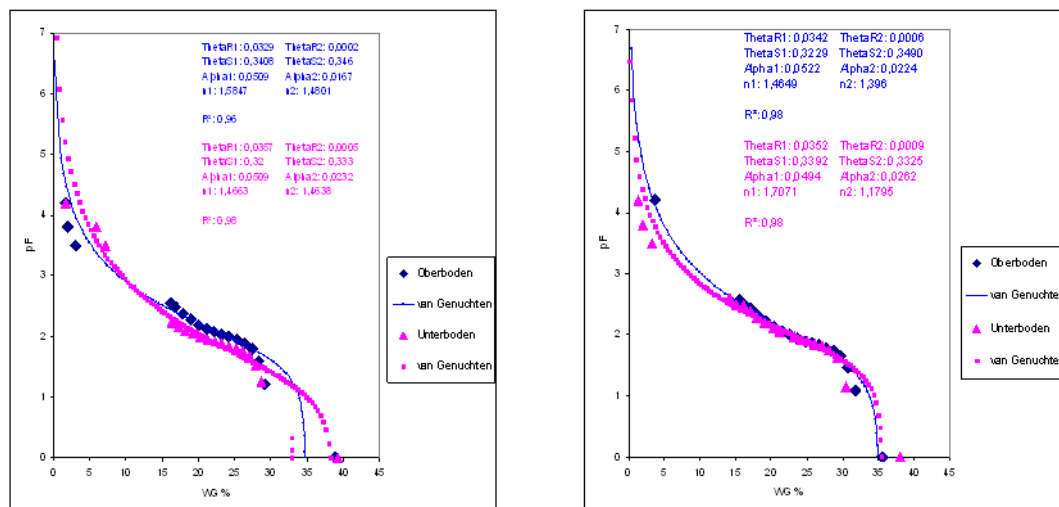


Abb. 18: Wasserretentionsfunktionen bei minimalem (links) und maximalem (rechts)  $C_{org}$ -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei flacher Bodenbearbeitung (17 cm), Berlin-Dahlem (2006)

Die im Labor gemessenen Werte der Gesamtporenvolumina beider Bodentiefen weisen mit 38,9 % und 39,2 % fast identische Werte auf. Ferner ist in beiden Kurven erkennbar, dass die gemessenen und die angepassten Kurven gut übereinstimmen (Oberboden  $R^2$ : 0,96; Unterboden  $R^2$ : 0,98). Auffallend ist der Unterschied der gefitte-

ten Gesamtporenvolumina-Werte der beiden Kurven, welche für den Oberboden mit 34,7 % und für den Unterboden mit 32,9 % im Vergleich zu den Labormessungen geringere Werte aufweisen.

Bei der niedrigsten  $C_{org}$ -Gehalt-Parzelle der flachen Bodenbearbeitungsvariante verlaufen die Retentionskurven tendenziell gleichartig und liegen in den beiden Bodentiefen fast übereinander. Die  $\theta$ -Abweichungen beider Kurven sind generell sehr gering. Die im Labor gemessenen Gesamtporenvolumina weisen im Oberboden bzw. in der bearbeiteten Bodenschicht 35,5 % und im Unterboden 38,1 % auf. Die nutzbaren Feldkapazitäts-Werte für den Oberboden liegen mit 24,0 % unter denen des Unterbodens, die einen Wert von 26,8 % aufweisen. Die gemessenen und die angepassten Kurven stimmen hier auch gut überein (Oberboden  $R^2$ : 0,98; Unterboden  $R^2$ : 0,98).

Die gemessenen Kurvenverläufe der ungesättigten Leitfähigkeiten der flachen Bodenbearbeitungsvariante mit dem niedrigsten und dem höchsten  $C_{org}$ -Gehalt (Abb. 19) entsprechen annähernd einander in beiden Bodentiefen.

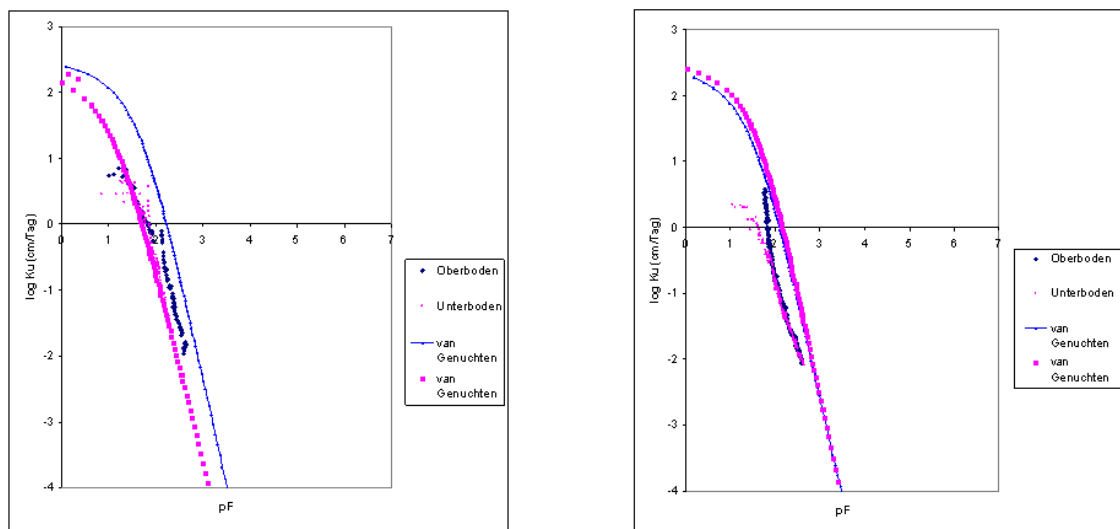


Abb. 19: Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Saugspannungen bei minimalem (links) und maximalem (rechts)  $C_{org}$ -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei flacher Bodenbearbeitung (17 cm), Berlin-Dahlem (2006)

Vergleicht man die gemessene ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit mit der aus der Retentionsfunktion  $\alpha$  und  $n$  modellierten  $K_u$ -Funktion, ist zu erkennen, dass die modellierte  $K_u$ -Funktion zu einer Überschätzung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit führt, welche mit abnehmendem  $pF$ -Wert sogar parallel verschoben steigt. Mit zunehmender Entwässerung ab  $\sim pF$  1,8 weisen die Poren etwa gleich große Leitfähigkeiten

auf. Die pF-Kurven der Parzellen mit tiefer Bodenbearbeitung und dem höchsten Anteil an  $C_{org}$  weisen zwischen 1,8 und 4,2 pF (nutzbare Feldkapazität) in beiden Tiefen (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) mit 23,2 % und 24,2 % fast identische Werte auf (Abb. 20).

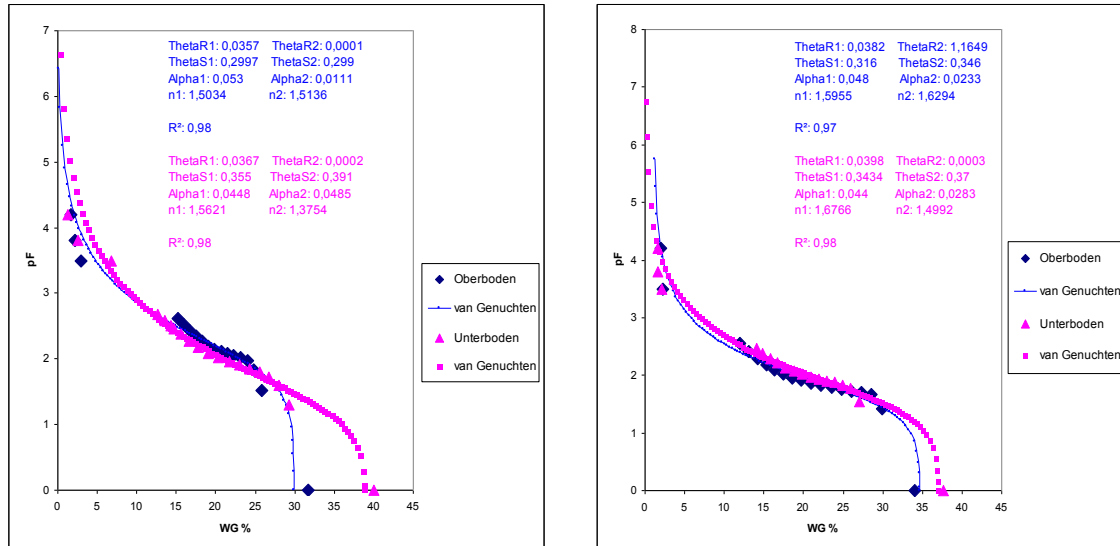


Abb. 20: Wasserretentionsfunktionen bei minimalem (links) und maximalem (rechts)  $C_{org}$ -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei tiefer Bodenbearbeitung (28 cm), Berlin-Dahlem (2006)

Interessante Feststellungen lassen sich für die gemessenen Gesamtporenvolumina bei der maximalen  $C_{org}$ -Gehalt-Parzelle in beiden Bodentiefen machen. Hier ist deutlich erkennbar, dass der Unterboden mit 40,0 % GPV einen höheren Wert aufweist, während im Oberboden sich dieser Wert deutlich geringer mit 31,7 % zeigt. Eine Ursache für den höheren GPV Anteil im Unterboden lässt sich mit einer niedrigeren Trockenrohdichte von  $1,59 \text{ g cm}^{-3}$  erklären, während diese im Oberboden  $1,81 \text{ g cm}^{-3}$  beträgt. Hinsichtlich der Aggregatstabilität sowie der Humus- und Tongehalte lässt sich diese Differenz nicht erklären, weil sie nur geringfügig voneinander abweichen. Bei der niedrigsten  $C_{org}$ -Gehalt-Parzelle der tiefen Bodenbearbeitungsvariante verlaufen die Retentionskurven gleichsinnig und liegen in den beiden Bodentiefen fast übereinander. Die  $\theta$ -Abweichungen beider Kurven sind generell sehr gering und lassen sich ab  $\sim 1,8 \text{ pF}$  bis zum Sättigungsbereich unterscheiden. Der Unterboden weist hier ein gering höheres GPV mit einem Wert von 37,7 % auf, während dieser Unterschied im Vergleich zu der maximalen  $C_{org}$ -Gehalt-Parzelle weniger ist. Die gemessenen und die angepassten Kurven stimmen hier auch gut überein.

Die aus den gefitteten Retentionskurven berechneten  $K_u$ -Funktionen der tiefen Bodenbearbeitungsvariante mit höchstem und niedrigstem  $C_{org}$ -Gehalt spiegeln annähernd den identischen Verlauf wie bei den gemessenen Labor  $K_u$ -Werten wider (Abb. 21).

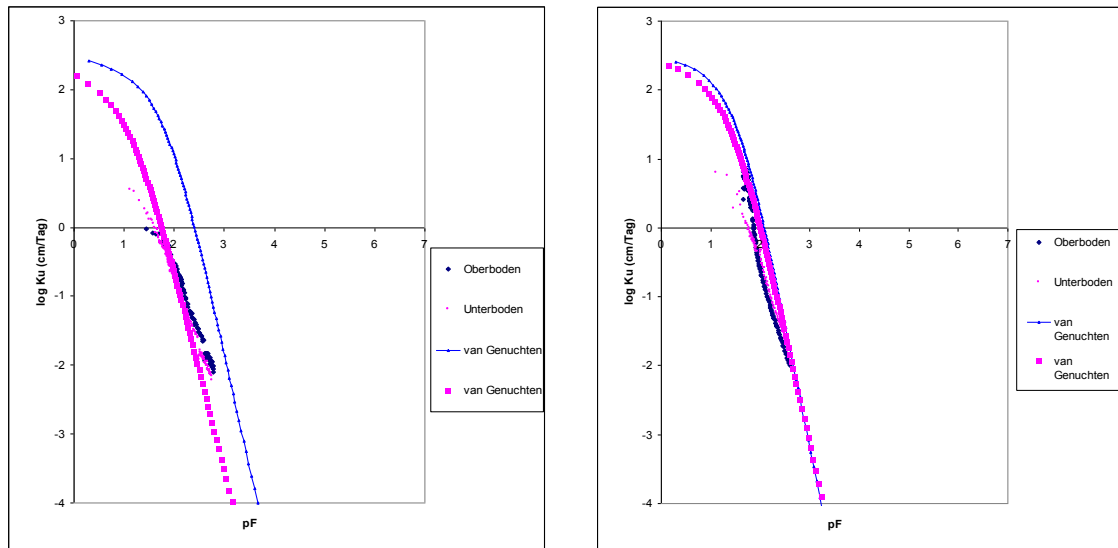


Abb. 21: Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Saugspannungen bei minimalem (links) und maximalem (rechts)  $C_{org}$ -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei tiefer Bodenbearbeitung (28 cm), Berlin- Dahlem (2006)

Ausgenommen ist die maximale  $C_{org}$ -Gehalt-Parzelle des Oberbodens, die mit einer geringeren Überschätzung den Verlauf führt. Die hydraulischen Leitfähigkeiten beider Parzellen haben im Oberboden als auch im Unterboden den gleichen Verlauf und weisen für die vorgefundenen sandigen Substrate charakteristisch geringe Leitfähigkeiten auf.

Für den Standort Dedelow werden in Abbildung 22 für die Direktsaat-Variante bei maximalem und minimalem  $C_{org}$ -Gehalt die Wasserretentionsfunktionen verglichen. Die im Labor ermittelten pF-Werte in der minimalen Variante stimmen in beiden Bodentiefen fast überein, obwohl die gefitteten Kurven ab  $pF \sim 1,8$  voneinander abweichen. Bei den Messwerten ist deutlich erkennbar, dass der Unterboden mit nahezu 44,0 % GPV einen höheren Wert im Vergleich zum Oberboden aufweist. Die gefitteten Funktionen stimmen hierbei gut überein.

Anders als in der Minimum-Variante der Direktsaat ist bei der maximalen  $C_{org}$ -Gehalt-Parzelle (rechts) deutlich erkennbar, dass die im Unter- und Oberboden gemessenen pF -Werte sich ab  $pF \sim 3,0$  bis zum Sättigungsgrad voneinander trennen (Abb. 22).

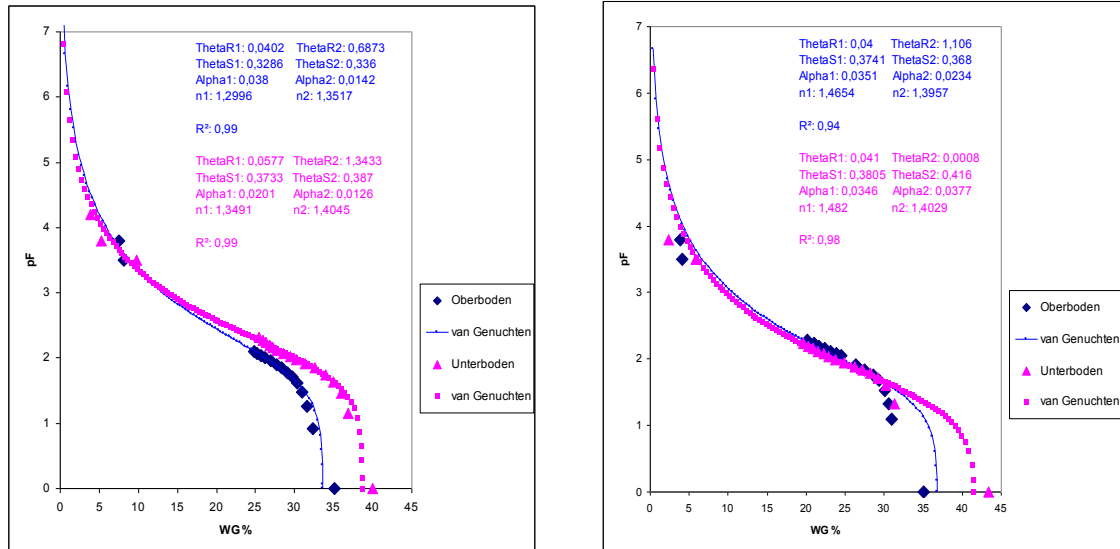


Abb. 22: Wasserretentionsfunktionen bei minimalem (links) und maximalem (rechts) C<sub>org</sub>-Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Direktsaat am Standort Dedelow (2007)

Hier wird sehr gut deutlich, dass der Unterboden einen höheren nutzbaren Feldkapazitätswert (28,7 Vol.-%) hat. Die gemessenen Gesamtporenvolumenwerte sind im Vergleich zur minimalen Variante nahezu identisch.

Die ungesättigten hydraulischen Eigenschaften der Parzellen der Direktsaat-Variante mit sehr unterschiedlichen C<sub>org</sub>-Gehalten am Standort Dedelow lassen sich nicht gut differenzieren (Abb. 23).

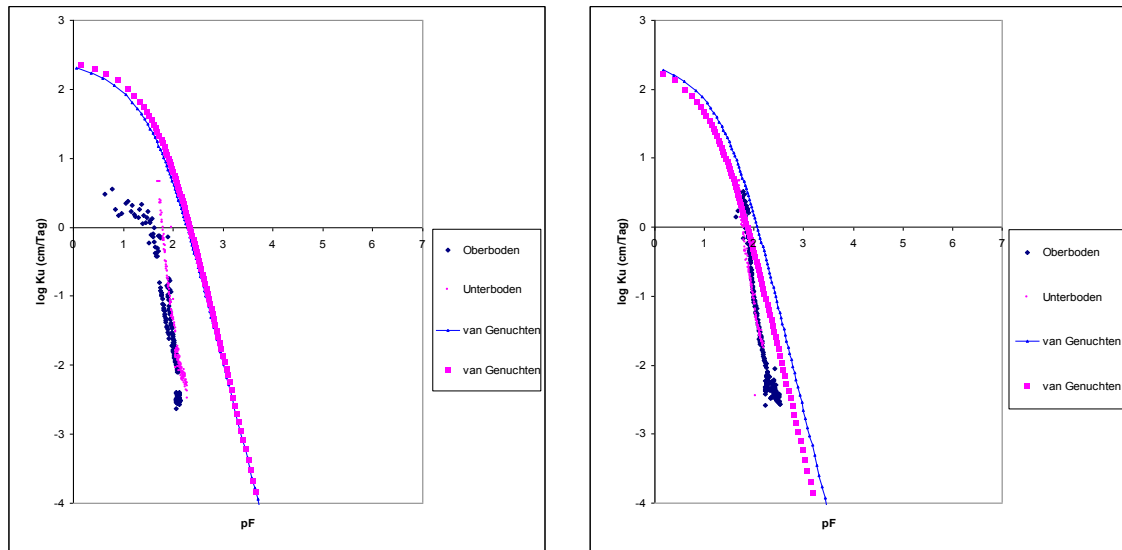


Abb. 23: Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Saugspannung bei minimalem (links) und maximalem (rechts)  $C_{org}$ -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Direktsaat am Standort Dedelow (2007)

Sowohl in der minimalen als auch in der maximalen Variante an  $C_{org}$  beider Bodentiefen sind die gemessenen Kurvenverläufe sehr ähnlich. Beachtet man die Wasserspannungskurve der Variante mit maximalem  $C_{org}$ -Gehalt für beide Bodentiefen, so würde sich für den Unterboden eine höhere ungesättigte Leitfähigkeit schätzen lassen, obwohl diese hier mit gering parallel verschobenem Ablauf sichtbar ist.

Im Gegensatz zur Direktsaat-Variante besitzt der Oberboden in der Grubber-Variante (10 cm) bei gleicher Saugspannung einen geringfügig höheren Wassergehaltsanteil im Vergleich zum Unterboden (Abb. 24).

Die nutzbare Feldkapazität in der minimalen  $C_{org}$ -Parzelle (links) weist im Oberboden 24,9 % auf, während dieser Faktor im Unterboden 22,9 % beträgt. Auch in der maximalen  $C_{org}$ -Gehalt-Variante (rechts) zeigt der Oberboden einen gering höheren nutzbaren Feldkapazitätswert mit 25,1 %. Beide Oberböden beinhalten im Sättigungsbereich höhere Gesamtporenvolumenwerte (Abb. 24).

Die ungesättigte Wasserleitfähigkeit beider  $C_{org}$ -Gehalt-Parzellen der Grubber-Variante (10 cm) lassen sich hier, wie bei der Direktsaat-Variante, auch nicht gut differenzieren. Sowohl in der minimalen als auch in der maximalen Variante beider Bodentiefen sehen die gemessenen Kurvenverläufe sehr ähnlich aus und haben einen sehr geringen Abstand zueinander (Abb. 25).

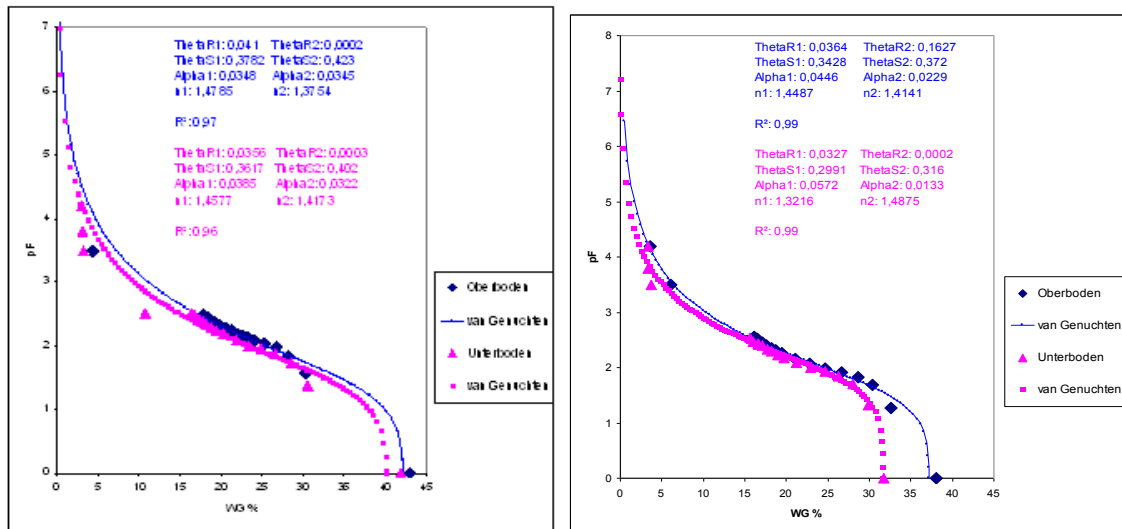


Abb. 24: Wasserretentionsfunktionen bei minimalem (links) und maximalem (rechts) Corg-Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Grubber (10 cm) am Standort Dedelow (2007)

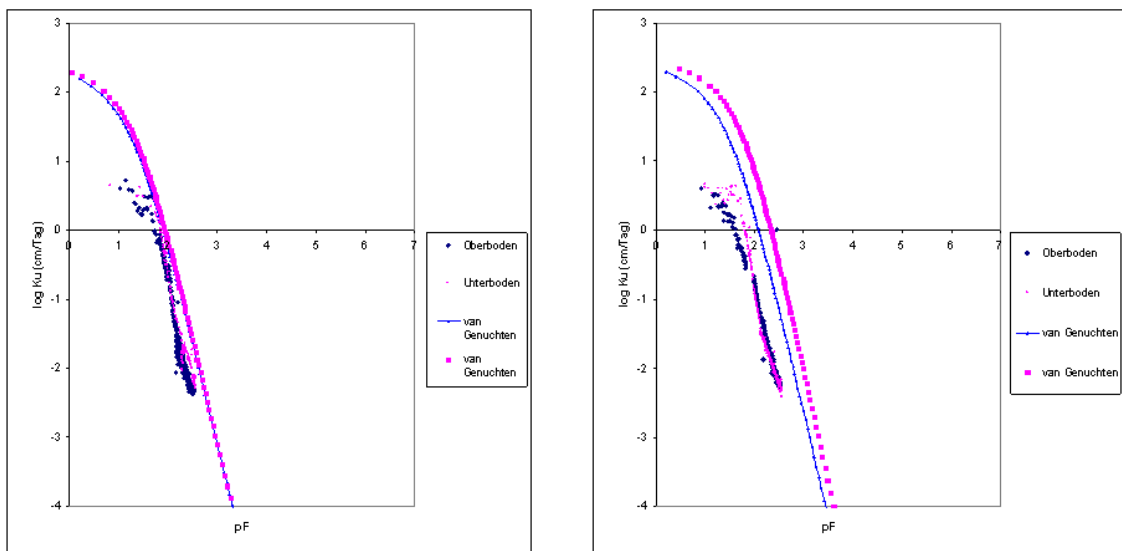


Abb. 25: Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Saugspannung bei minimalem (links) und maximalem (rechts) Corg-Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Grubber (10 cm) am Standort Dedelow (2007)

Jedoch ist der Verlauf typisch für sandige Substrate. In den folgenden Abbildungen (Abb. 26 und Abb. 27) werden die Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt (Wasserspannungskurve, pF-Kurve) und die Abhängigkeit der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit vom Wassergehalt in verschiedenen Substraten (Sand-, Schluff- und Tonböden) dargestellt.

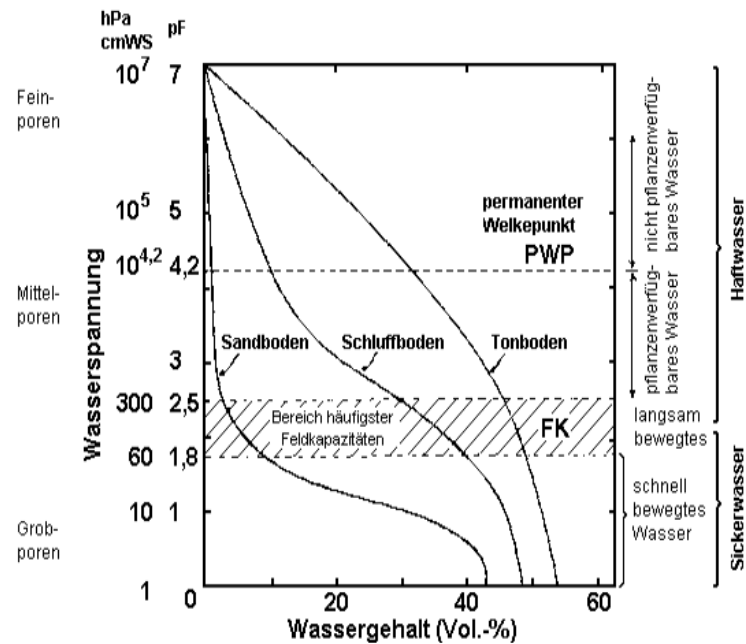


Abb. 26: Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt (Wasserspannungskurve, pF-Kurve) bei einem Sandboden, einem tonigen Schluffboden (Lössboden) und einem Tonboden (A-Horizonte) (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2010)

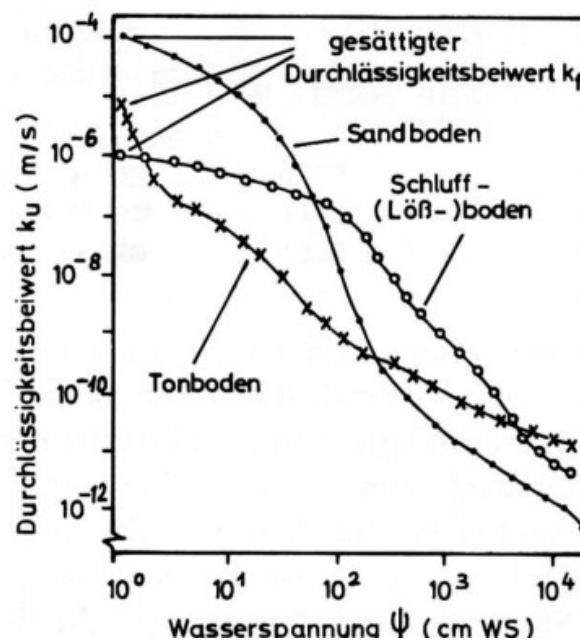


Abb. 27: Die Abhängigkeit der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit vom Wassergehalt (MATTHEß UND UBELL, 2003)

Die pF-Kurve am Standort Dedelow für das Bodenbearbeitungsverfahren Grubber (15 cm) zeichnet in der minimalen C<sub>org</sub>-Gehalt-Parzelle ab ~2,5 pF (Untergrenze der



Mittelporen) bis zum Sättigungsgrad (0 pF) im Oberboden im Vergleich zum Unterboden einen ähnlichen Verlauf (Abb. 28).

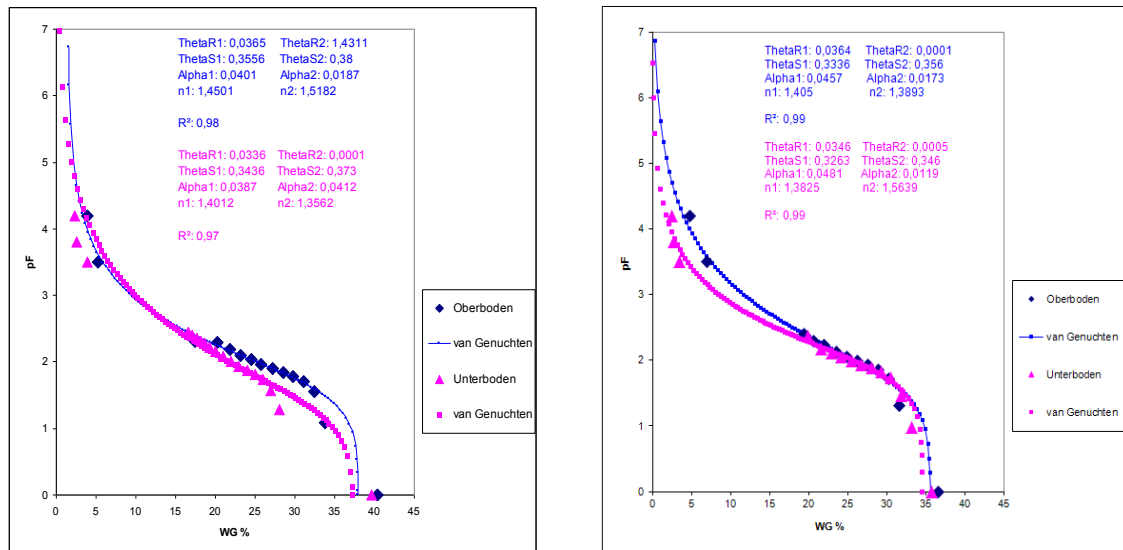


Abb. 28: Wasserretentionsfunktionen bei minimalem (links) und maximalem (rechts)  $C_{org}$ -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Grubber (15 cm) am Standort Dedelow (2007)

Der gemessene nFK-Wert ist im Oberboden 25,8 % und im Unterboden 22,7 %. Die Gesamtporenvolumenwerte beider Tiefen weisen mit nahezu 40 % die gleichen Werte auf.

Die pF-Kurven der maximalen  $C_{org}$ -Gehalt-Parzelle der Grubber Variante verlaufen auf unterschiedlichem Niveau parallel ab ~2,5 pF. Ab diesem Wert bis zum Sättigungsgrad haben sie den gleichen Verlauf und enden mit ungefähr gleichen Gesamtporenvolumen-Werten (36 %). Die nutzbare Feldkapazität des Oberbodens weist 24,0 % und im Unterboden einen tendenziell höheren Wert von 26,7 % auf.

Für das Porensystem des Sandbodens ergeben sich auch hier für die Grubber-Variante (15 cm) für beide  $C_{org}$ -Gehalt-Parzellen kaum Unterschiede entsprechend der gemessenen hydraulischen Leitfähigkeiten (Abb. 29).

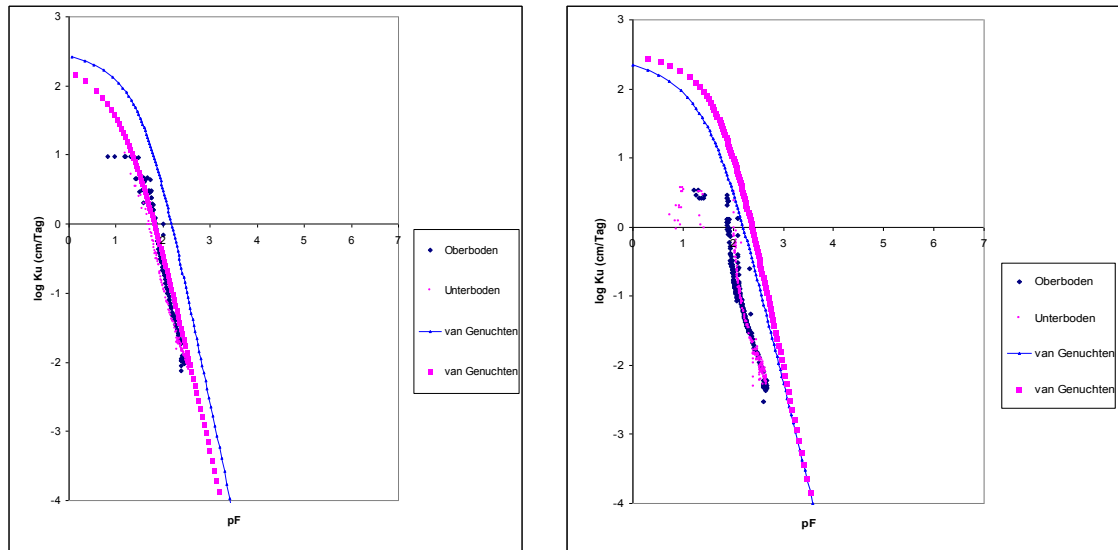


Abb. 29: Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Saugspannung bei minimalem (links) und maximalem (rechts) C<sub>org</sub>-Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Grubber (15 cm) am Standort Dedelow (2007)

Die ungesättigten Wasserleitfähigkeitsfunktionen spiegeln hier die gleichen Verläufe wie in der Grubber- (10 cm) und Direktsaat-Variante wider. Die angepassten Kurven zeigen für beide Varianten geringfügig parallel verschobene Verläufe.

Im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung treten hier bei der minimalen als auch bei der maximalen C<sub>org</sub>-Gehalt-Parzelle des Pfluges (15 cm) etwas höhere nFK-Werte auf (Abb. 30).

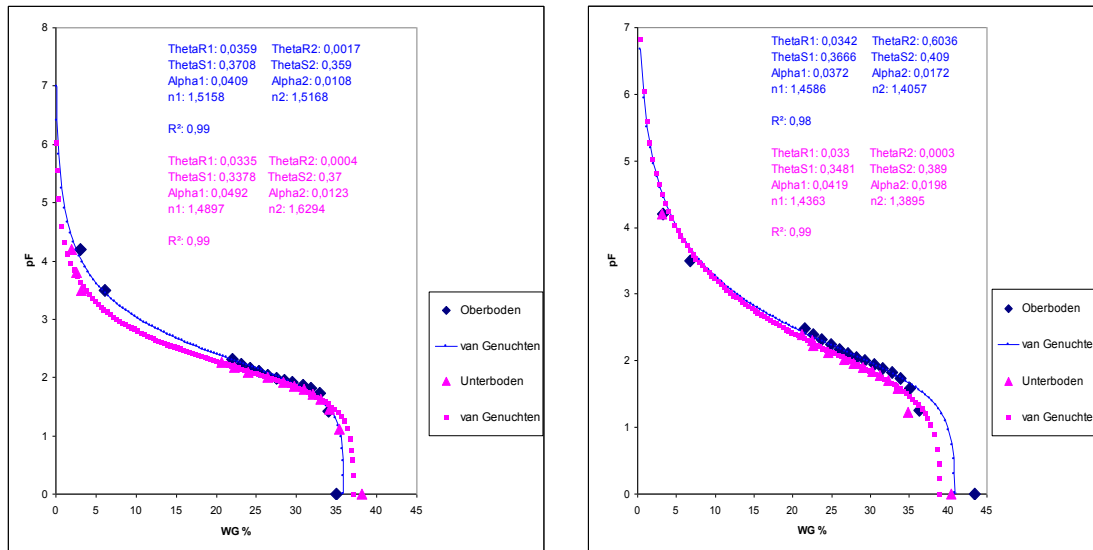


Abb. 30: Wasserretentionsfunktionen bei minimalem (links) und maximalem (rechts)  $C_{org}$ -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Pflug (15 cm) am Standort Dedelow (2007)

In der minimalen  $C_{org}$ -Gehalt-Variante beträgt die nutzbare Feldkapazität des Oberbodens 28,7 % und die des Unterbodens 28,1 %. In der maximalen  $C_{org}$ -Gehalt-Parzelle weist die nutzbare Feldkapazität 29,5 % und 27,0 % auf. Beide Varianten enthalten fast die gleichen Gesamtporenvolumenwerte mit ungefähr 40,0 %, mit Ausnahme des Oberbodens der minimalen  $C_{org}$ -Gehalt-Variante mit 35,0 %. Der höhere nutzbare Feldkapazitätswert des Oberbodens in der maximalen  $C_{org}$ -Gehalt-Variante lässt sich mit einem relativ höheren  $C_{org}$ -Gehalt erklären (0,87 %).

Die gemessenen  $K_u$ -Werte beider Parzellen der Pflug-Variante (15 cm) zeigen mit einem gering höheren Abstand des Oberbodens einen parallelen Verlauf (Abb. 31).

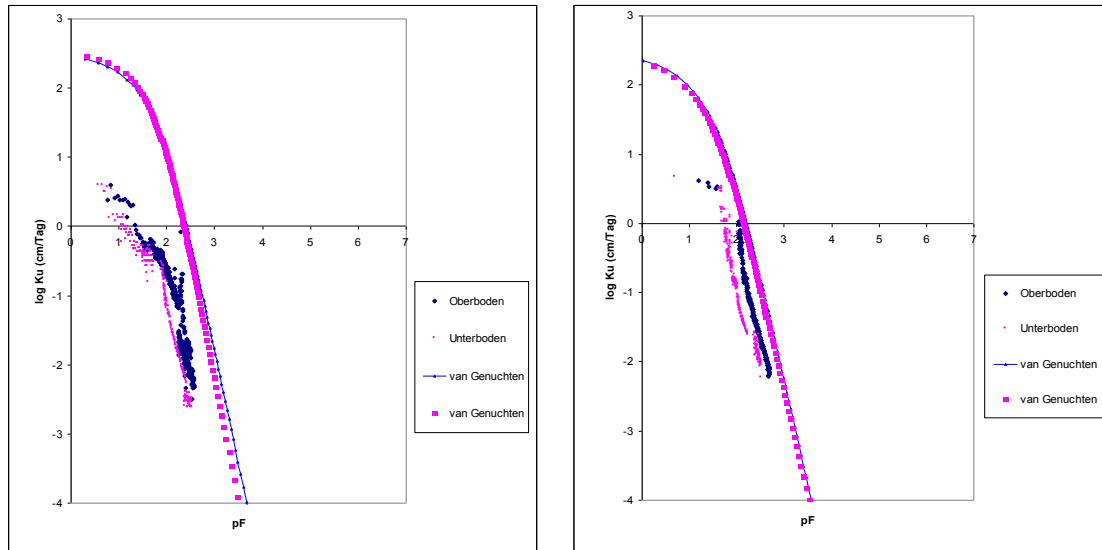


Abb. 31: Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Saugspannung bei minimalem (links) und maximalem (rechts)  $C_{org}$ -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Pflug (15 cm) am Standort Dedelow (2007)

Die gefitteten Kurvenverläufe der ungesättigten Wasserleitfähigkeit beider  $C_{org}$ -Gehalt-Parzellen weisen hier auch einen gekrümmten Verlauf auf und zeigen nahezu den gleichen Schnittpunkt auf der x-Achse.

Für den Standort Dedelow weist der Oberboden bei tiefer Pflugbearbeitung in der minimalen  $C_{org}$ -Gehalt-Parzelle bei gleichen Druckstufen höhere nutzbare Feldkapazitätswerte auf (Abb. 32).

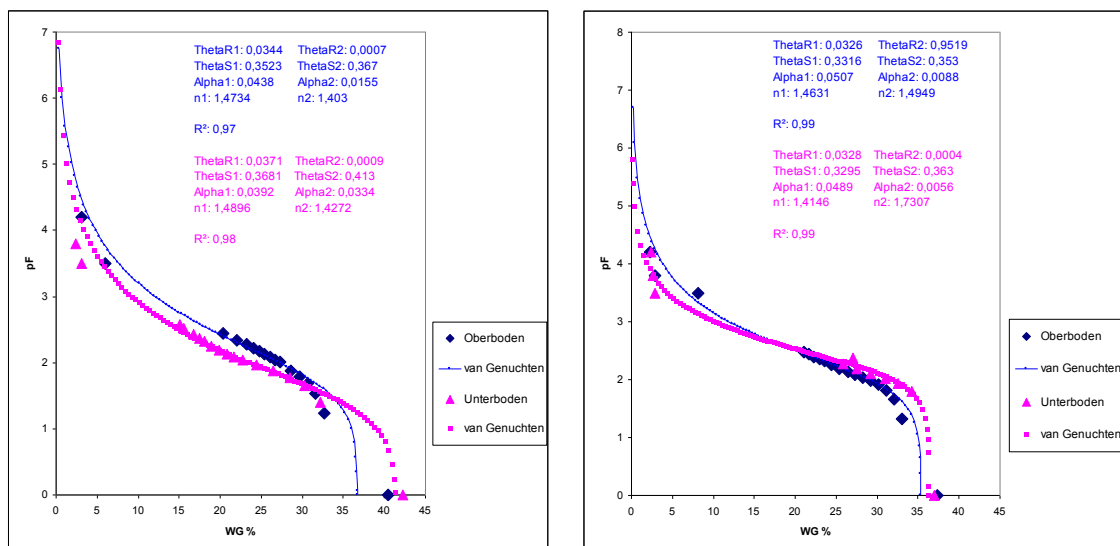


Abb. 32: Wasserretentionsfunktionen bei minimalem (links) und maximalem (rechts)  $C_{org}$ -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Pflug (25 cm) am Standort Dedelow (2007)

Die gefittete Kurve im Oberboden zeigt 26,2 % nutzbare Feldkapazität und im Unterboden 24,5 %. Die Gesamtporenvolumenwerte liegen mit etwa 40,0 % und 42,0 % auf dem gleichen Niveau und sind für sandige Böden sehr typisch, obwohl im Vergleich zur konservierenden Bodenbearbeitung und der Direktsaat-Variante geringere Werte erwartet wurden. Die  $C_{org}$ -Gehalte beider Parzellen liegen zwischen 0,69 % und 0,81 %. Interessanterweise zeigen in der minimalen Pflug-Variante die gemessenen Gesamtporenvolumen höhere Werte im Vergleich zur konservierenden und zu der Direktsaat-Variante.

Auch bei den Messungen der ungesättigten Wasserleitfähigkeit mit der Verdunstungsmethode für beide Parzellen mit Pflug (25 cm) zeigt sich ein ähnlicher Verlauf bei den ungesättigten Wasserleitfähigkeitsfunktionen im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung und zur Direktsaat (Abb. 33). Es konnten kaum Unterschiede im Transportverhalten zwischen den Bearbeitungsvarianten festgestellt werden.

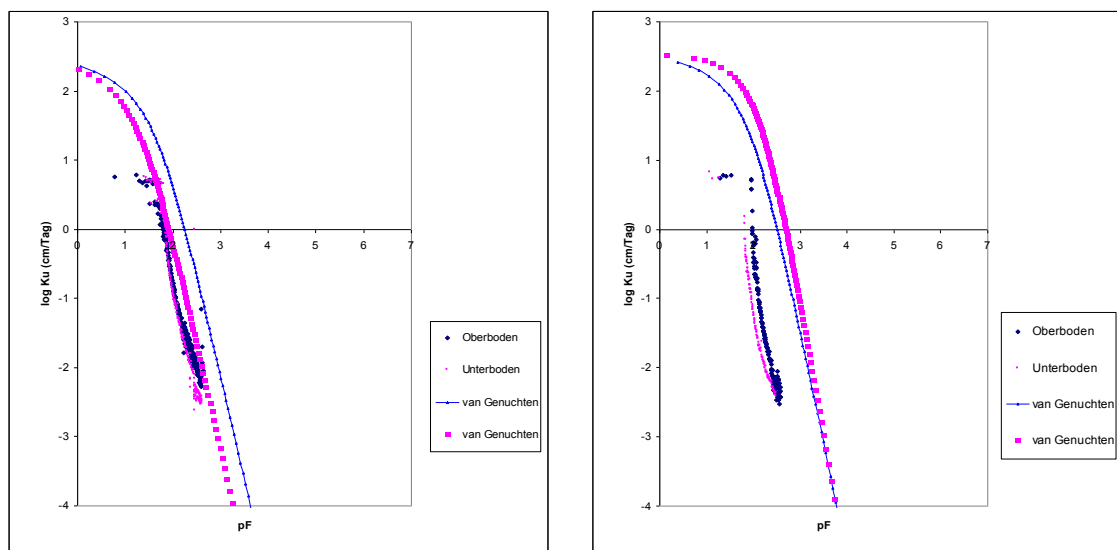


Abb. 33: Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Saugspannung bei minimalem (links) und maximalem (rechts)  $C_{org}$ -Gehalt im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm) bei Pflug (25 cm) am Standort Dedelow (2007)

### 4.3 Diskussion zu bodenphysikalischen Merkmalen

Die Untersuchung und Bewertung der Wirkung unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die vertikale Differenzierung des Durchdringungswiderstandes ist von großer Bedeutung.

KRZYSCH ET AL. (1992) weisen darauf hin, dass die Mächtigkeit des Ap-Horizontes im Laufe der Versuchsjahre in Berlin-Dahlem (DIII) bei der flachen Variante bis etwa 22,6 cm und in der tiefen Variante bis etwa 33,3 cm zugenommen hat. Die Messungen des Durchdringungswiderstandes veranschaulichen für die optimal versorgte Variante „mit Kalk- und mit Stallmistdüngung“ im Durchschnitt einen um 1 MPa höheren Durchdringungswiderstand in der tieferen Variante und zeigen in den oben genannten zugenommenen Bodentiefen die entsprechenden Krumenbasisverdichtungen für beide Bodenbearbeitungsvarianten. Betrachtet man die Standortheterogenität beider Bodenbearbeitungsvarianten, so ist zu erkennen, dass bei der flachen Variante die minimale Decksandmächtigkeit bei 40 cm und bei der tieferen Variante bei 35 cm liegt. Beide Messungen der Durchdringungswiderstände werden bezüglich deren Krumenbasisverdichtungen (trotz der zugenommenen Ap-Horizonte) unter den gleichen Bodenarten bzw. unter sandigen Substraten berücksichtigt. Erwartungsgemäß weist die tiefere Variante eine höhere Krumenbasisverdichtung auf. Die Grenzwerte der Durchdringungswiderstandsmessungen liegen nach PETELKAU UND ROGASIK (1994) für diese sandigen Böden unter dem Gefährdungsbereich, die flache Bodenbearbeitung zeigt tendenziell jedoch niedrigere Verdichtungsempfindlichkeitswerte auf.

Die aus der Literatur bekannte Gefüge verbessernde Wirkung von Kalk- und Stallmistdüngung ist bei den flachen und tiefen Bodenbearbeitungsverfahren in Berlin-Dahlem einzeln zu beobachten. Beide Varianten stellen innerhalb der Bearbeitungstiefen (17 cm und 28 cm) bessere Struktureigenschaften des Bodens dar und weisen tendenziell niedrigere Verdichtungswerte auf. Zusätzlich können Zwischenfrüchte, mehrjähriges Ackerfutter und Rotationsbrachen zur Aggregatstabilisierung beitragen (DIEPENBROCK ET AL., 2009). Daher reduziert sich die Gefahr der Bodenschadverdichtung und der Boden kann frühzeitiger im Frühjahr bewirtschaftet werden (WEYER, 2008).

Im Krumenbasisbereich bzw. unterhalb der bearbeiteten Bodentiefen ändert sich diese Situation, wofür die Ursache das ständige Aufbringen des Düngermaterials auf diese

Flächen sein könnte. Nach einer Studie von MARSCHALL UND STAHL (2004) wurden die Vorbelastungen von 31 repräsentativen Ackerschlägen in Sachsen gemessen. Nach den Untersuchungen kam heraus, dass die Sand- und Tonböden bei einem Bodenfeuchtegehalt von pF 1,8 im Schnitt geringere Vorbelastungen in den Unterböden als die Schluff- und Lehm Böden zeigten.

Aufgrund der unterschiedlichen Bodenbearbeitungstiefen bilden sich in Dedelow differenzierte Bodenfestigkeitswerte aus. Die Bodendichteveränderung lässt sich in 0-15 cm Bodentiefe unter Direktsaat mit höchsten Durchdringungswiderstands-Werten finden. Die Eingriffsintensität in den Boden ist hier minimal und verursacht im Gegensatz zu den anderen Varianten eine festere Bodenschicht. Demgegenüber weisen beide Pflugvarianten in den entsprechenden Bodenbearbeitungstiefen die geringsten Durchdringungswiderstandswerte auf, was auf eine bessere Auflockerung mit höherem Grobporenanteil in dieser Bodenoberschicht zurückzuführen ist. Die Ergebnisse von Dahlem und Dedelow sind nicht ohne Weiteres direkt zu vergleichen, da die Boden-substrate sich unterscheiden und somit eine etwas höhere Bodenfeuchte zum Zeitpunkt der Messung bei Feldkapazität als auch die kürzere Versuchszeit den Vergleich verbieten.

Ein weiterer Indikator für eine gute Struktureigenschaft ist die Aggregatstabilität. Die Aggregatstabilität wird von zahlreichen bodenphysikalischen (z.B. Bodenart), chemischen (z.B.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ) und biologischen (z.B. Humusgehalt) Faktoren beeinflusst. Dies spielt insbesondere für sandige Böden eine wichtige Rolle.

Trotz der höheren Durchdringungswiderstandswerte in der flachen Variante im Bereich 10 - 15 cm Bodentiefe in Berlin-Dahlem wurde unter dem Prüfglied „ohne Kalk- und mit Stallmistdünger“ eine verbesserte Aggregatstabilität im Gegensatz zu dem, der mit Kalk und ohne Stallmist gedüngt wurde, aufgezeigt. Der niedrigste Anteil der wasserstabilen Aggregate zeigte sich in der Variante der unterlassenen Düngung, wobei das Ergebnis zur „mit Kalk- und ohne Stallmistdünger“-Variante statistisch nicht gesichert werden konnte. Dies belegt die Meinung von WILDHAGEN (2006), dass für die Aggregatbildung in Böden mindestens ein Tongehalt von 15 % vorhanden sein muss.

Die wasserstabilen Aggregate in Dedelow weisen in den konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren tendenziell höhere Werte im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung auf. Das kann daran liegen, dass durch die fehlende Bodenwendung die

instabilen Bruchstellen zwischen den Aggregaten brechen und dadurch sich in der konservierenden Bodenbearbeitung stabilere Bodenaggregate ausbilden (EPPERLEIN, 2001). Zwischen dem Humusgehalt und der Aggregatstabilität konnte in Dedelow keine direkte/eindeutige Beziehung festgestellt werden. Demgegenüber können aus der Reduzierung der Bearbeitungstiefe höhere Werte bei der mikrobiellen Biomasse und schließlich bei der Humusanreicherung resultieren. Dies hat mehrere Effekte, so wird z.B. die Stabilität der Bodenaggregate erhöht, wodurch die Widerstandsfähigkeit gegen Erosionen und Verschlämmungen erhöht wird. Dies ist gerade auf leichten Sandstandorten von großer Bedeutung (ELLMER UND EPPERLEIN, 2006). Höhere Aggregatstabilität und höherer Regenwurmbesatz als Voraussetzung für höhere Infiltrationsraten und einen dadurch verringerten Wasserabfluss und Bodenabtrag können sich nur durch pfluglose Bestellverfahren entwickeln (SCHMIDT, 2004).

Die Veränderung der Struktur durch verschiedene Bodenbearbeitungen ist von zahlreichen Autoren in der Literatur beschrieben. Diese Veränderungen, bedingt durch jahreszeitliche Bodenbearbeitung, hängen von der Bodenstabilität bzw. Bodenstruktur und deren Nutzungen ab (HARTGE UND HORN, 1999). Wie in der vorliegenden Arbeit dargestellt ist, haben verschiedene Bodenbearbeitungen verschiedene Effekte auf die Grobporen bzw. auf die strukturbedingten Poren, welche sowohl auf die nutzbare Feldkapazität als auch auf die Luftkapazität einen negativen Einfluss haben. Aufgrund der Sackung durch diese langjährigen Bearbeitungen wirkt sich dies zu stabileren Strukturen aus, aber die Bedingungen für das Pflanzenwachstum werden ungünstiger (HARTGE UND HORN, 1999).

Die ermittelten Wasserspeicherkurven aus den flach (in Verbindung mit der Anreicherung der organischen Substanz im Gegensatz zur tiefen Variante) und tief gepflügten Parzellen zeigen insgesamt nur geringe Unterschiede in Berlin-Dahlem. Ein Vergleich zwischen den Parzellen mit dem maximalen und minimalen  $C_{org}$ -Gehalt in 10 - 15 cm Bodentiefe (flach: Parzelle Nr. 13, „mit Kalk- und mit Stallmistdüngung“; tief: Parzelle Nr. 46, „ohne Kalk- und mit Stallmistdüngung“) zeigt bei den gemessenen Werten, dass die nutzbare Feldkapazität bei der flachen Variante mit 25,7 Vol.-% einen 4,1 % höheren Wert aufweist. In der unteren Bodentiefe bzw. in 20 - 25 cm sind die nutzbaren Feldkapazitätswerte für diese Parzellen fast identisch (23,5 Vol.-% und 23,3 Vol.-%). Betrachtet man alle Einzelparzellen der entsprechenden  $C_{org}$ -Gehalte (Tab. 14 und Tab. 15) vom höchsten bis zum niedrigsten, so ist zu sehen, dass die nutzbaren Feldkapazitätswerte sich nicht nach dieser Zuordnung einstufen lassen. Der höchst gemes-



sene nutzbare Feldkapazitätswert befindet sich in der mittleren  $C_{org}$ -Gehalt-Parzelle mit 29,0 % in der flachen Variante, die ohne Kalk aber mit Stallmist gedüngt wurde. Generell lassen sich die flach bearbeiteten Parzellen in 10 - 15 cm Bodentiefe mit höheren nutzbaren Feldkapazitäts- und Feldkapazitätswerten auf eine gering höhere Ebene einstufen, was aber nicht der Fall für 20 - 25 cm Bodentiefe ist. In dieser Bodenschicht befinden sich die  $C_{org}$ -Gehalte auf dem gleichem Niveau und die Differenz zwischen flach und tief ist sehr gering. Die geringfügig höheren  $C_{org}$ -Gehalte in den flach bearbeiteten Parzellen wirken sich nicht auf höhere nutzbare Feldkapazitäts- und Feldkapazitätswerte aus. Betrachtet man lediglich die höchsten und niedrigsten  $C_{org}$ -Gehalt-Parzellen in der 20 - 25 cm Bodentiefe (flach: Parzellen Nr. 13, „mit Kalk- und mit Stallmistdüngung“; tief: Parzellen Nr. 46, „ohne Kalk- und mit Stallmistdüngung“), so ist zwischen deren nutzbaren Feldkapazitäts- und Feldkapazitätswerten kein großer Unterschied zu sehen. Der höchste gemessene nutzbare Feldkapazitäts-Wert weist in der niedrigsten  $C_{org}$ -Gehalt-Parzelle der flachen Bodenbearbeitung in 20 - 25 cm Bodentiefe (flach, Parzellen Nr. 1, „mit Kalk- und mit Stallmistdüngung“) 26,8 Vol.-% auf, wobei sich der Tongehalt im Vergleich zu den anderen Parzellen mit 2,8 % auf der letzten Stufe befindet. Demgegenüber befindet sich der niedrigste gemessene nutzbare Feldkapazitätswert (20,2 Vol.-%) in der mittleren hohen  $C_{org}$ -Gehalt-Parzelle (flach: Parzellen Nr. 9, „mit Kalk- und mit Stallmistdüngung“). Die Aggregatstabilitätsmessungen weisen für die höchste gemessene nutzbare Feldkapazitätsparzelle mit 22,13 Vol.-% im Vergleich zur minimalen nutzbaren Feldkapazitätsparzelle (13,65 Vol.-%) einen deutlich höheren Strukturwert auf, welches eine wichtige Ursache der höheren Wasserspeicherkapazität sein könnte. Verschiedene Autoren beschreiben in ihren Arbeiten erhöhte Makroporositätsanteile bei konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren gegenüber konventioneller Verfahren. Nach einer Studie von ZACHARIAS (2004) wurde auf einem landwirtschaftlichen Bodenbearbeitungsversuch im Mulde-Lösshügelland, der seit neun Jahren konservierend bearbeitet wurde, in 40 cm Bodentiefe ein um 2-3 Vol.-% signifikant höherer Sättigungswassergehalt bzw. ein erhöhter Makroporenanteil festgestellt.

Die gemessenen Wasserretentionswerte in verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren in Dedelow weisen unregelmäßige Streuungen auf, so dass es schwierig ist, eindeutige Wirkungen dieser Behandlungen auf den Wasserhaushalt des Bodens aufzuzeigen. Unterschiede treten hier tendenziell mit gering höheren Volumenprozenten in den konventionellen Bodenbearbeitungen in 10 - 15 cm Bodentiefe auf, wo die nutzba-

ren Feldkapazitätswerte im Vergleich zur konservierenden und zur Direktsaat-Variante höher sind. Der höchste  $C_{org}$ -Gehalt (0,87 %) befindet sich in der Pflug-Variante (15 cm) in 10 - 15 cm Tiefe, für welche die nutzbare Feldkapazität, die Feldkapazität und das Gesamtporenvolumen auch im Vergleich zu den anderen Bodenbearbeitungsverfahren den höchsten Wert aufweist. Der den konservierenden Bodenbearbeitungssystemen von verschiedenen Autoren zugeschriebene positive Effekt auf die Bodenstruktur und die damit verbundene höhere Feldkapazität und nutzbare Feldkapazität lässt sich in diesem Dauerfeldversuch nicht finden. Die Ursache für die gering höhere Differenzierung der nutzbaren Feldkapazität in Volumenprozent ist hier in der Wechselwirkung zwischen der Trockenrohdichte bzw. dem niedrigeren Durchdringungswiderstand, und dem  $C_{org}$ - und Tongehalt zu suchen. Konventionelle Bodenbearbeitungen weisen in beiden Bodentiefen geringere Festigkeitswerte auf.

Nach einer Studie von WENDROTH (1990) kann man anhand der langsamen Verdunstungsmethode bei den Messungen der ungesättigten Wasserleitfähigkeiten auf sandigen Böden kaum Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten feststellen. SCHINDLER ET AL. (1985) weisen darauf hin, dass beim Vergleich der  $K_u$ -Labormessungen mit der langsamen Verdunstungsmethode und den aus der pF-Kurve geschätzten Leitfähigkeiten zwar die Steigung der  $k(\Psi)$ -Funktion meist richtig berechnet werden kann, aber die richtige Einordnung der Funktion im Koordinatensystem nur anhand von gemessenen Funktionen ermittelt werden kann. JAYNES UND TYLER (1980) weisen darauf hin, dass beim Vergleich von Stechzylinderproben, die im Labor gemessenen  $K_u$ -Funktionen und die im Feld ermittelten  $k(\Psi)$ -Beziehung zwar bei Sandböden noch recht gute Übereinstimmungen zwischen Feld- und Labormessungen bestehen, aber dass mit zunehmendem Schluff- und Tongehalt größere Abweichungen aufgrund von Hysterese auftreten.

Der Wertebereich des Bestimmtheitsmaßes ( $R^2$ ) liegt zwischen 0 und 1. Es hat sich gezeigt, dass in Berlin-Dahlem als auch in Dedelow für die Bodentiefen 10 - 15 cm und 20 - 25 cm bei allen gemessenen und angepassten Wasserretentionskurven mit dem Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) eine gute Übereinstimmung erzielt wurde (siehe Anhang Abb. 2 bis Abb. 4, Abb. 8 und Abb. 9).

## 4.4 Bodenchemische Eigenschaften

In diesem Ergebnisteil werden die ausgewählten bodenchemischen Eigenschaften pH-Wert, Gesamtkohlenstoff und heißwasserlöslicher Kohlenstoff, Gesamtstickstoff und heißwasserlöslicher Stickstoff, C/N-Verhältnis und Kationenaustauschkapazität einzeln ausgewertet.

### 4.4.1 pH-Wert

Der pH-Wert am Standort Berlin-Dahlem wurde durch unterschiedliche Düngungen und Bodenbearbeitungstiefen sowohl in 10 - 15 cm wie auch in 20 - 25 cm Bodentiefe beeinflusst (Tab. 18 und Tab. 19).

In der oberen Bodenschicht von 10 - 15 cm ist der pH-Wert in der flach gepflügten Variante jeweils immer niedriger als in der tief gepflügten Variante, wobei nur bei der Variante „mit Kalk- und mit Stallmistdüngung“ die Werte nicht statistisch gesichert sind (Tab. 18).

Tab. 18: pH-Wert in 10 - 15 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	5,5 de	5,8 de
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	5,4 d	6,0 e
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	3,9 ab	4,4 c
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	3,5 a	4,0 bc
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = 5%)= 0,45		

Der Einfluss der Kalkdüngung ist erwartungsgemäß in allen Varianten statistisch gesichert nachweisbar. Es konnten in beiden Bodenbearbeitungstiefen keine Unterschiede zwischen unterlassener und durchgeführter Stallmistdüngung festgestellt werden.

Auch in der Beprobungstiefe 20 - 25 cm wiesen die pH-Werte in den tief bearbeiteten Parzellen höhere Werte im Gegensatz zu den flach bearbeiteten Parzellen auf (Tab. 19), wobei hier nur die Werte der ungedüngten Variante statistisch abgesichert sind.

Tab. 19: pH-Wert in 20 - 25 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	5,6 c	5,9 c
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	5,6 c	6,0 c
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	3,9 ab	4,3 b
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	3,5 a	4,0 b
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = 5%)= 0,42		

Bezüglich des Einflusses von Kalk- und Stallmistdüngung bestehen dieselben Aussagen wie für die Bodenschicht 10 - 15 cm.

Für den Standort Dedelow lagen die pH-Werte für die verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren zwischen 5,40 und 5,93 (Tab. 20).

Tab. 20: pH-Werte in verschiedenen Bodentiefen der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten (Dedelow, 2007)

Bodenbearbeitungsvarianten	pH-Wert	
	10 - 15 cm	20 - 25 cm
Direktsaat	5,40 a	5,57 a
Mulch (10 cm)	5,70 a	5,77 a
Grubber (15 cm)	5,53 a	5,60 a
Pflug (15 cm)	5,53 a	5,60 a
Pflug (25 cm)	5,87 a	5,93 a
LSD <sub>A*B</sub> ( $\alpha$ = 5%)	0,62	0,72

Die pH-Werte unterscheiden sich zwischen den Beprobungstiefen nur unwesentlich; ein geringer Trend zu höheren Werten in größerer Tiefe ist zu beobachten. Direktsaat hat die geringsten, tiefes Pflügen die höchsten pH-Werte jeweils in beiden Beprobungstiefen zur Folge.

#### 4.4.2 Gesamtkohlenstoff und heißwasserlöslicher Kohlenstoff

Eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Bodenbildung und die Bodenfruchtbarkeit ist der Humus. Der Humus beeinflusst die physikalischen, chemischen und biologi-

schen Bodeneigenschaften. Landwirtschaftliche Bewirtschaftungssysteme (Bodenbearbeitung, Düngung) können sich auf den Humusgehalt verschieden auswirken. Ergebnisse werden für den Gesamtkohlenstoff und heißwasserlöslichen Kohlenstoff auf verschiedenen Standorten dargestellt.

Beim Versuch am Standort Berlin-Dahlem führen unterschiedliche Bodenbearbeitungssysteme zu einer vertikalen Differenzierung des Gesamtkohlenstoffgehalts. Die Gesamtkohlenstoffgehalte variieren zwischen 0,57 und 1,03 % in der Bodentiefe 10 - 15 cm. Bei flacher Bodenbearbeitung kommt es gegenüber der tiefen Bodenbearbeitung mit dem Pflug zu einer statistisch gesicherten Anreicherung in dieser Bodentiefe (Tab. 21).

Tab. 21: Gesamtkohlenstoffgehalt (%) in 10 - 15 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	1,03 e	0,74 cd
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	0,81 d	0,63 ab
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	0,98 e	0,67 bc
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	0,80 d	0,57 a
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = %5)= 0,16		

Der höchste Gesamtkohlenstoffgehalt liegt mit 1,03 % in den flach bearbeiteten Parzellen unter dem Prüfglied „mit Kalk- und mit Stallmistdüngung“ vor. Bei unterlassener Stallmistdüngung der flach bearbeiteten Parzellen unterschieden sich die Gesamtkohlenstoffgehalte signifikant niedriger als bei denen, die mit Stallmist gedüngt wurden. Im Vergleich zu den tief bearbeiteten Parzellen unter dem Prüfglied „ohne Kalk- und ohne Stallmistdüngung“ wies die flache Variante mit 0,80 % einen signifikant höheren Wert im Gegensatz zu der tiefen Variante auf.

Die Ursache für die unterschiedlichen Gesamtkohlenstoffgehalte der einzelnen Prüfglieder bei der flachen Variante kann mit den unterschiedlichen Einarbeitungstiefen und der Verteilung des Stallmistes erklärt werden.

In der Bodentiefe 20 - 25 cm wiesen in den flach bearbeiteten Parzellen die Gesamtkohlenstoffgehalte im Vergleich zu den tief bearbeiteten Parzellen tendenziell höhere Werte auf (Tab. 22).

Tab. 22: Gesamtkohlenstoffgehalt (%) in 20 - 25 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	0,75 d	0,72 cd
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	0,66 bcd	0,58 ab
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	0,64 abcd	0,62 abc
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	0,64 abcd	0,55 a
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = %5)= 0,18		

Die Gesamtkohlenstoffgehalte variieren zwischen 0,55 und 0,75 %. In der flachen Bearbeitung konnten zwischen „mit Kalk- und ohne Stallmistdünger“ und „ohne Kalk- und mit Stallmistdünger“ keine signifikant gesicherten Werte festgestellt werden. Im Gegensatz zu der tiefen Variante unterschieden sich diese Werte auch gering. Die Pflugtiefe in Kombination mit Stallmistdüngung und Kalkdüngung führte in 20 - 25 cm Bodentiefe zu keinen signifikanten Unterschieden. Die Gesamtkohlenstoffgehalte der unterschiedlichen Bodenbearbeitungssysteme am Standort Dedelow wiesen in beiden Bodentiefen ähnliche Werte auf (Tab. 23).

Tab. 23: Gesamtkohlenstoffgehalte (%) in verschiedenen Bodentiefen der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten (Dedelow, 2007)

Prüfglieder	Gesamtkohlenstoffgehalt (%)	
	10 - 15 cm	20 - 25 cm
Direktsaat	0,62 b	0,59 c
Mulch (10 cm)	0,75 a	0,60 c
Grubber (15 cm)	0,74 a	0,61 c
Pflug (15 cm)	0,81 a	0,58 c
Pflug (25 cm)	0,74 a	0,58 c
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = %5)	0,09	0,18

In der 10 - 15 cm Bodenbearbeitungstiefe bei der Direktsaat-Variante erschien der Gesamtkohlenstoffgehalt im Gegensatz zu den konservierenden und konventionellen Systemen signifikant niedriger.

Unter dem heißwasserlöslichen Kohlenstoff versteht man nach dem Begriff von KÖRSCHENS ET AL. (1990) alle leicht verfügbaren Kohlenstoffverbindungen und den mikrobiell gebundenen Kohlenstoff in Böden. Deshalb ist der heißwasserlösliche Kohlenstoff bzw. der leicht umsetzbare Anteil des Kohlenstoffs ( $C_{hwl}$ -Gehalt) die am leichtesten lösliche Fraktion der gesamten organischen Substanz. Die löslichen Bestandteile gehören zu der dynamischen bzw. aktiven Fraktion. Die Bedeutung liegt in der großen Mobilität im Boden und in der Funktion als Träger von Nährstoffen.

Für Sand- und Lehmböden mit Jahresdurchschnittstemperaturen von 6 bis 10 °C und Jahresniederschlägen von 400 bis 800 mm leitet SCHULZ (1997) fünf  $C_{hwl}$ -Gehaltsklassen ab (Tab. 24).

Tab. 24:  $C_{hwl}$ -Bereiche für Sand- und Lehmböden mit Jahresdurchschnittstemperaturen von 6 bis 10 °C und Jahresniederschlägen von 400 bis 800 mm (nach SCHULZ, 1997)

$C_{hwl}$ – Bereich (mg 100 g <sup>-1</sup> Boden)	Gehaltsklasse
1 (sehr hoch)	> 40
2 (hoch)	30-40
3 (mittel; anzustreben)	25-30
4 (gering)	20-25
5 (sehr gering)	< 20

Die Untersuchungen des  $C_{hwl}$ -Gehaltes in 10 - 15 cm Bodentiefe am Standort Berlin-Dahlem wiesen bei flacher Bodenbearbeitung in den einzelnen Prüfgliedern deutlich höhere  $C_{hwl}$ -Werte auf (Tab. 25).

Tab. 25:  $C_{hwl}$ -Gehalte (%) in 10 - 15 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	42,64 b	26,89 a
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	36,64 b	25,25 a
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	51,45 c	29,86 a
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	42,69 b	25,62 a
LSD <sub>A*B*C</sub> (α= %5)= 6,23		

Die Werte variieren zwischen 25,25 – 51,45 mg 100 g<sup>-1</sup>. Demnach befinden sich die C<sub>hwl</sub>-Gehalte in Berlin-Dahlem bei flacher Bodenbearbeitung in der Bodentiefe 10 - 15 cm im hohen bis sehr hohen Bereich, während bei der tiefen Bodenbearbeitung diese Werte nur im mittleren Bereich eingestuft werden. Die Mengenverteilung des heißwasserlöslichen Kohlenstoffs in den Prüfgliedern wies nicht die gleiche Reihenfolge wie die Gesamtgehalte an organischer Substanz auf. Von besonderem Interesse ist in der flachen Bodenbearbeitung unter dem Prüfglied „ohne Kalk- und mit Stallmistdüngung“ der signifikante Unterschied im C<sub>hwl</sub>-Anteil mit einem Höchstwert von 51,45 mg 100 g<sup>-1</sup>. Alle anderen C<sub>hwl</sub>-Werte der flachen Variante gruppieren sich im gleichen statistischen Bereich. Unerwartet trat in der flachen Variante in „ohne Kalk- und ohne stallmistgedüngten“ Parzellen fast der gleiche C<sub>hwl</sub>-Gehalt auf wie in denen, die mit Kalk- und Stallmist gedüngt wurde.

Die C<sub>hwl</sub>-Gehalte in den tief bearbeiteten Parzellen ergaben die gleiche Reihenfolge wie bei den flach bearbeiteten Parzellen. Dennoch sind diese Werte signifikant niedriger im Gegensatz zur flachen Bodenbearbeitung. Der höchste C<sub>hwl</sub>-Gehalt mit einem tendenziell höheren Wert von 29,89 mg 100 g<sup>-1</sup> wurde dennoch in der tiefen Variante gemessen, wo mit Kalk- und mit Stallmist gedüngt wurde.

Die C<sub>hwl</sub>-Gehalte der flachen Variante in 20 - 25 cm Bodentiefe variieren nicht stark voneinander (Tab. 26).

Tab. 26: C<sub>hwl</sub>-Gehalte (%) in 20 - 25 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	31,41 bcd	26,14 abc
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	25,07 ab	21,60 a
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	35,51 d	29,44 bcd
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	33,08 cd	25,83 ab
LSD <sub>A*B*C</sub> (α= %5)= 7,72		

In der flachen Variante der geprüften oberen Bodenschicht erreichte der C<sub>hwl</sub>-Gehalt unter dem Prüfglied „ohne Kalk- und mit Stallmistdüngung“ den höchsten Wert mit 35,51 mg 100 g<sup>-1</sup>. Der niedrigste C<sub>hwl</sub>-Gehalt befand sich unter dem Prüfglied „mit Kalk- und ohne Stallmistdüngung“. Die C<sub>hwl</sub>-Gehalte befanden sich bei flacher Bodenbearbei-



tung im hohen bis sehr hohen Bereich, während in der tiefen Variante sich die Werte im Bereich an der unteren Grenze der mittleren Stufe befanden. Obwohl der Verlauf der  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalte in 10 - 15 cm Bodentiefe nicht die entsprechenden  $C_{\text{org}}$ -Gehalte der verschiedenen Bodenbearbeitungssysteme in Dedelow widerspiegelt, stehen diese mit dem Humusgehalt in einem engen Verhältnis (Tab. 27).

Tab. 27:  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalte ( $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ ) in verschiedenen Bodentiefen der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten (Dedelow, 2007)

Bodenbearbeitungs-varianten	$C_{\text{hwl}}$ ( $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ )	
	10 - 15 cm	20 - 25 cm
Direktsaat	40,64 ab	19,76 b
Grubber (10 cm)	49,77 a	18,20 b
Grubber (15 cm)	41,93 ab	25,03 ab
Pflug (15 cm)	45,50 ab	24,53 ab
Pflug (25 cm)	36,49 b	29,80 a
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha = 5\%$ )	12,88	8,34

Der höchste  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalt in 10 - 15 cm Bodentiefe entspricht hier der Grubber-Variante (10 cm), obwohl der höchste  $C_{\text{org}}$ -Gehalt in der gleichen Bodentiefe in der Pflug-Variante (15 cm) erkennbar war. Auch die Direktsaat-Variante wies den geringsten  $C_{\text{org}}$ -Gehalt auf, wobei der niedrigste  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalt in der Pflug-Variante gefunden wurde. Die  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalte lagen in Dedelow in 10 - 15 cm Bodentiefe im hohen bis sehr hohen Bereich. Allerdings waren diese Unterschiede statistisch nicht gesichert. In der unteren Bodentiefe (20 - 25 cm) traten hier deutlich niedrigere Werte als in der oberen Schicht auf. Die  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalte befanden sich hier im sehr geringen bis mittleren Bereich. Hier treten die höchsten und niedrigsten Werte in der Pflug- (25 cm) und Grubber-Variante (10 cm) mit 29,80 mg je 100 g<sup>-1</sup> und 18,20 mg je 100 g<sup>-1</sup> auf.

#### 4.4.3 Gesamtstickstoff und heißwasserlöslicher Stickstoff

Eines der wichtigsten Elemente in der organischen Bodensubstanz (OBS), das neben dem Kohlenstoff eine bedeutende Rolle spielt, ist der „Stickstoff“. Durch die Speicherung von Stickstoff und anderen Nährstoffen ist die organische Bodensubstanz eine bedeutende Nährstoffquelle für die Mikroorganismen und Pflanzen.

Im Gegensatz zum  $C_{org}$ - und  $C_{hwl}$ -Gehalt führt die unterschiedliche Bodenbearbeitung und Düngung zu keiner eindeutigen Differenzierung im Gehalt an Gesamtstickstoff, welcher jedoch für Sandboden typisch ist (Tab. 28).

Tab. 28:  $N_t$ -Gehalte (%) in 10 - 15 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	0,073 e	0,053 bc
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	0,058 cd	0,046 ab
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	0,066 de	0,051 abc
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	0,051 abc	0,041 a
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = %5)= 0,01		

Der Gesamtstickstoffgehalt variiert in 10 - 15 cm Bodentiefe zwischen 0,041 - 0,073 %. Erwartungsgemäß wurde in der flachen Variante der höchste Wert mit 0,073 % unter dem Prüfglied „mit Kalk- und Stallmistdüngung“ ausgewiesen. Pflugtiefe in Kombination mit Stallmistdüngung führte in der flachen Variante zu den höchsten  $N_t$ -Gehalten, welche, im Gegensatz zur tiefen Variante, statistisch gesicherte höhere Werte aufwiesen. Allerdings wurde in der flachen Bodenbearbeitung bei der Zufuhr von beiden Düngungsmaterialien im Vergleich zur tieferen Variante ein signifikant höherer Unterschied festgestellt. Die unterlassene Düngung in den beiden Pflugvarianten unterschieden sich bezüglich des Gesamtstickstoffgehalts jedoch nur sehr gering.

Der Einfluss der Bodenbearbeitungssysteme in flach und tief bearbeiteten Parzellen in 20 - 25 cm Bodentiefe führte diesmal zu keinen signifikanten Unterschieden der Stickstoffgehalte unter der Kombination mit Stallmistdüngung und Pflugtiefe (Tab. 29).

Tab. 29:  $N_t$ -Gehalte (%) in 20 - 25 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	0,061 d	0,053 cd
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	0,050 bc	0,043 ab
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	0,053 bc	0,048 bc
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	0,050 bc	0,038 a
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = %5)= 0,01		

Die Unterschiede in der vertikalen Verteilung beider Bodenbearbeitungstiefen wiesen bei allen Düngungsvarianten, abgesehen von der tiefen Bodenbearbeitung mit unterlassener Kalk- und Stallmistdüngung, keine signifikante Abnahmen der Stickstoffgehalte auf. Der signifikant höchste Stickstoffgehalt wurde bei der flachen Variante in den „mit Kalk- und mit Stallmist“ gedüngten Parzellen mit 0,061 % festgestellt.

Der Gesamtstickstoffgehalt ( $N_t$ -Gehalt) in Dedelow befand sich bei verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren in beiden Bodenbearbeitungstiefen auf etwa gleichem Niveau (Tab. 30).

Tab. 30:  $N_t$ -Gehalte ( $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ ) in verschiedenen Bodentiefen der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten (Dedelow, 2007)

Prüfglieder	$N_t$ -Gehalt ( $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ )	
	10 - 15 cm	20 - 25 cm
Direktsaat	0,060 b	0,053 a
Mulch (10 cm)	0,067 ab	0,057 a
Grubber (15 cm)	0,063 b	0,059 a
Pflug (15 cm)	0,077 a	0,060 a
Pflug (25 cm)	0,070 ab	0,057 a
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha = 5\%$ )	0,012	0,020

Statistisch gesicherte Ergebnisse konnten nur in der 10 - 15 cm Pflug-Variante (15 cm) festgestellt werden. Die Unterschiede in der vertikalen Verteilung waren jedoch bei allen Bodenbearbeitungsverfahren sehr gering.

Da der Boden in den untersuchten Tiefen nicht ausgesprochen carbonathaltig ist, kann der Gehalt an Gesamtkohlenstoff dem des organischen Kohlenstoffs ( $C_{\text{org}}$ ) gleichgesetzt werden. Im Vergleich zu den Humusgehalten bzw.  $C_{\text{org}}$ -gehalten der entsprechenden Bodentiefen war der höchste und niedrigste Gesamtstickstoffgehalt auch in der Pflug- und Direktsaat-Variante (15 cm) erkennbar.

Der Gehalt an heißwasserlöslichem Stickstoff ( $N_{\text{hw}}$ ) liegt in flach bearbeiteten Parzellen in 10 - 15 cm Bodentiefe zwischen 7,19 und 9,98  $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$  (Tab. 31).

Tab. 31:  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte ( $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ ) in 10 - 15 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	9,98 abc	11,37 bc
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	8,13 ab	9,79 abc
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	9,36 abc	12,28 c
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	7,19 a	10,07 abc
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha = 5\%$ ) = 4,06		

Erwartungsgemäß ist der höchste Wert mit  $9,98 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$  in der Variante „Zufuhr von Kalk- und Stallmistdünger“ ermittelt worden. Die unterlassene Kalkdüngung wirkt sich in der mit Stallmist gedüngten Variante durch eine geringe Abnahme des heißwasserlöslichen Stickstoffgehaltes aus. Die Kalkdüngung hat hier auf den heißwasserlöslichen Stickstoffgehalt eine fördernde Rolle. Bei Betrachtung der einzelnen Prüfglieder zeigten sich in der tiefen Variante im Gegensatz zur flachen Bodenbearbeitung signifikant höhere Werte. Der größte Unterschied lag mit  $2,92 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$  beim Prüfglied „unterlassene Kalkdüngung und Zufuhr von Stallmistdüngung“. Jedoch sind die Differenzen der restlichen Prüfglieder annähernd gleich. Die heißwasserlöslichen Stickstoffgehalte befanden sich in der tiefen Variante auf etwa gleichem Niveau.

Die Differenz der heißwasserlöslichen Stickstoff-Werte zwischen den flach und tief bearbeiteten Parzellen war sehr gering und es zeigten sich die höchsten Werte sowohl in der flachen als auch in der tiefen Variante unter dem Prüfglied „durch Zufuhr von Kalk- und Stallmistdünger“ (Tab. 32).

Tab. 32:  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte ( $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ ) in 20 - 25 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, 2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	7,97 c	7,91 c
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	6,07 ab	6,07 ab
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	7,82 bc	7,46 abc
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	5,84 a	5,95 a
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha = 5\%$ ) = 1,82		

Unter dem Einfluss von verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren auf den heißwasserlöslichen Stickstoffgehalt am Standort Dedelow ergaben sich innerhalb der einzelnen Bodentiefen keine signifikanten Unterschiede (Tab. 33).

Tab. 33:  $N_{\text{hwl}}$ -Gehalte ( $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ ) in verschiedenen Bodentiefen der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten (Dedelow, 2007)

Bodenbearbeitungs- variante	$N_{\text{hwl}}$ -Gehalt ( $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ )	
	10 - 15 cm	20 - 25 cm
Direktsaat	6,20 a	4,61 ab
Mulch (10 cm)	6,38 a	3,79 b
Grubber (15 cm)	5,53 a	5,00 a
Pflug (15 cm)	6,51 a	4,13 ab
Pflug (25 cm)	5,87 a	5,01 a
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha = 5\%$ )	1,52	1,20

Die absoluten Unterschiede zwischen den verschiedenen Bodentiefen sind allerdings statistisch gesichert. Die heißwasserlöslichen Stickstoffwerte wiesen stets höhere Werte im Oberboden im Vergleich zum Unterboden auf.

#### 4.4.4 C/N-Verhältnis

Durch das C/N-Verhältnis ist es möglich, Aussagen zur Umsatzgeschwindigkeit der organischen Bodensubstanz zu treffen. Das C/N-Verhältnis bzw. das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff in Böden ist in der Regel in mineralischen Böden 14:15 (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2010). Je kleiner die Zahl, desto enger ist das C/N-Verhältnis und umso besser die Stickstoffverfügbarkeit.

Das C/N-Verhältnis in 10 - 15 cm Bodentiefe der untersuchten Varianten schwankte zwischen 13,94 und 15,63 (Tab. 34), d.h. es hatte sich keine große Differenzierung zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten entwickelt.

Tab. 34: Das C/N-Verhältnis in 10 - 15 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem; 2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	14,49 a	13,94 a
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	14,73 ab	14,38 a
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	14,57 ab	14,33 a
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	15,63 b	14,32 a
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = %5)= 1,13		

Insbesondere konnte bei flachen Bodenbearbeitungstiefen bei „fehlendem Kalk und Stallmistdünger“ ein maximaler und statistisch gesicherter Wert von 15,63 festgestellt werden. Die geringeren C/N-Verhältnisse in der flachen Variante durch Zufuhr von Stallmistdüngung spiegeln sich in erhöhten  $C_{org}$ -Werten wider. Die beste Stickstoffverfügbarkeit stellte die flache Variante unter dem Prüfglied „mit Kalk- und Stallmistdünger“ dar, welche auch eine statistische Sicherung aufweist.

Im Vergleich zu der flachen Variante wurden in den tief bearbeiteten Parzellen unter den gleichen Prüfgliedern tendenziell niedrigere C/N-Verhältnisse erzielt. Auffällig war in der tiefen Variante das niedrige und statistisch bedeutende C/N-Verhältnis bei unterlassener Kalk- und Stallmistdüngerezufuhr. Es wurden in der tiefen Bodenbearbeitungsvariante keine Unterschiede zwischen den C/N-Verhältnissen nachgewiesen.

Der Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf das C/N-Verhältnis in der 20 - 25 cm Bodentiefe schwankte zwischen 12,45 und 14,34. In allen Fällen trat ein normales C/N-Verhältnis auf. Auch hier wurde keine große Differenzierung zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten festgestellt.

Der geringste Anteil an C/N wurde mit einem Wert von 12,45 in der flachen Variante unter dem Prüfglied „mit Kalk- und Stallmistdüngung“ erzielt (Tab. 35).

Tab. 35: Das C/N-Verhältnis in 20 - 25 cm Bodentiefe in den ausgewählten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem; 2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	12,45 a	13,64 bcd
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	13,28 abc	14,07 cd
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	13,09 ab	13,30 abc
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	13,94 bcd	14,34 d
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = %5)= 0,95		

In den anderen Prüfgliedern traten jedoch sehr homogene Verhältnisse von 13,09 bis 13,94 auf. Abgesehen von den „mit Kalk und mit Stallmist“ gedüngten Parzellen wurde in den Parzellen durch Zufuhr von Stallmistdüngung ein tendenziell niedrigeres C/N-Verhältnis im Gegensatz zu den anderen Prüfgliedern ermittelt. In der tief bearbeiteten Variante zeigte sich das geringste C/N-Verhältnis in dem Prüfglied „mit Kalk- und Stallmistdüngung“. Erwartungsgemäß konnte in der gleichen Bodenbearbeitungstiefe unter dem Prüfglied „unterlassene Kalk- und Stallmistdüngung“ ein höheres Verhältnis mit 14,34 festgestellt werden, ohne dass eine statistische Sicherung möglich war.

Bei Betrachtung des C/N-Verhältnis in zunehmender Tiefe unter dem Einfluss beider Bodenbearbeitungssysteme wurden keine großen Unterschiede beobachtet (Tab. 36).

Tab. 36: Das C/N-Verhältnis in verschiedenen Bodentiefen der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten (Dedelow, 2007)

Prüfglieder	C/N- Verhältnis	
	10 - 15 cm	20 - 25 cm
Direktsaat	10,01 b	11,14 a
Mulch (10 cm)	11,67 a	10,63 ab
Grubber (15 cm)	11,39 ab	10,34 ab
Pflug (15 cm)	10,99 ab	10,02 b
Pflug (25 cm)	10,77 ab	10,38 ab
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = %5)	1,47	0,98

Im Vergleich zum Standort Dahlem liegt das C/N-Verhältnis in Dedelow bei allen unterschiedlichen Bodenbearbeitungsverfahren auf dem gleichen Niveau mit niedrigeren Werten vor. Das C/N-Verhältnis in allen Untersuchungstiefen schwankte zwischen 10,01 und 11,67. Das günstigste Verhältnis wies die Direktsaat-Variante in 10 - 15 cm Bodenbearbeitungstiefe mit einem statistisch gesicherten Wert von 10,01 auf.

#### **4.4.5 Kationenaustauschkapazität**

Die Kationenaustauschkapazität (KAK) ist eine wichtige Kenngröße zur Abschätzung des Sorptionsvermögens eines Bodens gegenüber Nähr- und Schadstoffen (BLUME ET AL., 2010). Die Art und Menge der Tonminerale, der pH-Wert und der Gehalt an organischer Substanz beeinflussen die Höhe der Kationenaustauschkapazität.

Für die tonarmen Sandböden in Berlin-Dahlem ist zu erwarten, dass zwischen der  $KAK_{pot}$  und dem Tongehalt lediglich ein schwacher Zusammenhang besteht, während die  $KAK_{pot}$  und der  $C_{org}$ -Gehalt in den flach und tief bearbeiteten Parzellen einen bemerkenswerten Zusammenhang darstellen. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die Höhe der  $KAK_{pot}$  der untersuchten sandigen Böden in Dahlem hauptsächlich durch den Gehalt an  $C_{org}$  bestimmt wird bzw. der Einfluss des Tongehaltes auf die Höhe der  $KAK_{pot}$  als gering einzuschätzen ist.

Die  $KAK_{pot}$  der untersuchten Bodenbearbeitungstiefen variiert zwischen  $5,5 \text{ cmol kg}^{-1}$  und  $9,89 \text{ cmol kg}^{-1}$  in 10 - 15 cm Bodentiefe und zeigt damit eine enge Variationsbreite. Aus der Abb. 34 geht hervor, dass die gemessenen  $KAK_{pot}$ -Werte der Parzellen mit hohem  $C_{org}$ -Gehalt in der flachen Bodenbearbeitung zwischen  $6,55 \text{ cmol kg}^{-1}$  und  $9,89 \text{ cmol kg}^{-1}$  liegen, gefolgt von der in den tief bearbeiteten Parzellen zwischen  $5,50 \text{ cmol kg}^{-1}$  und  $6,72 \text{ cmol kg}^{-1}$ . Humusreduktion kann insbesondere im Oberboden zur Verringerung des Bindungsvermögens und damit zur Verschlechterung der Nährstoffversorgung führen (HELMES, 2004).

Die Höhe der KAK ist allerdings auch stark pH-abhängig und die effektive Kationenaustauschkapazität ( $KAK_{eff}$ ) kann sich unter diesen Umständen wesentlich von der  $KAK_{pot}$  unterscheiden. Auf dem Dauerversuch in Dahlem kann daher mit einer geringeren effektiven Kationenaustauschkapazität gerechnet werden.



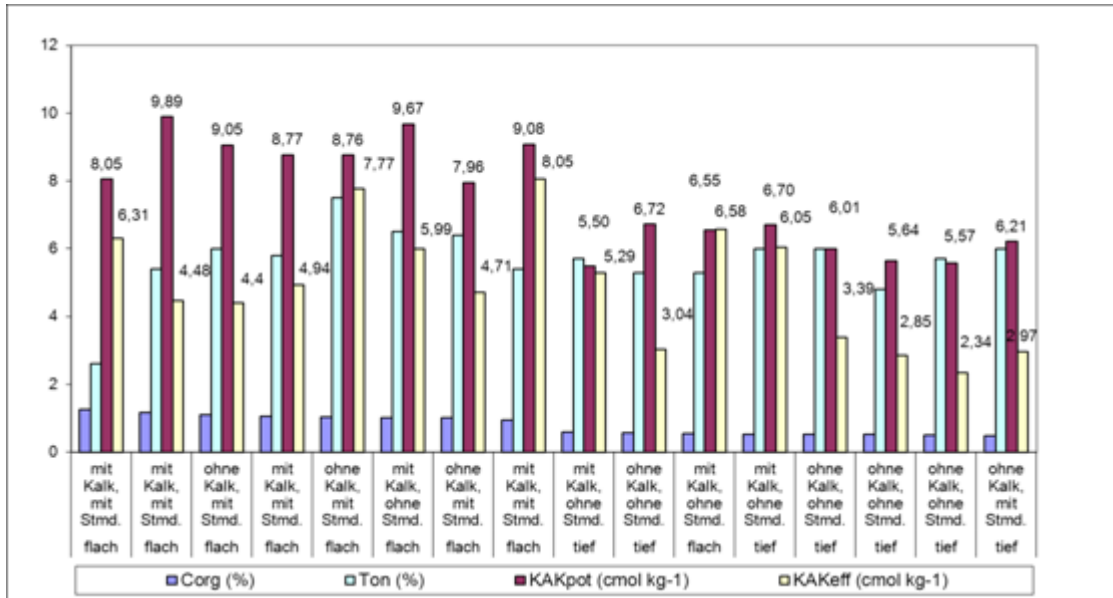


Abb. 34: Darstellung der KAKeff, KAKpot, Corg- und Tongehalte in flacher und tiefer Bodenbearbeitung in 10 - 15 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem; 2006)

Die KAK<sub>pot</sub> der untersuchten Bodenbearbeitungstiefen variiert zwischen 5,47 cmol kg<sup>-1</sup> und 9,30 cmol kg<sup>-1</sup> in 20 - 25 cm Bodentiefe (Abb. 35). Hier variieren die untersuchten KAK<sub>pot</sub>-Werte in der flachen Bodenbearbeitungstiefe zwischen 6,40 cmol kg<sup>-1</sup> und 9,30 cmol kg<sup>-1</sup>, gefolgt von den tief bearbeiteten Parzellen zwischen 5,47 cmol kg<sup>-1</sup> und 6,72 cmol kg<sup>-1</sup>. Dies entspricht annähernd den gleichen KAK<sub>pot</sub>-Werten wie in 10 - 15 cm Bodentiefe.

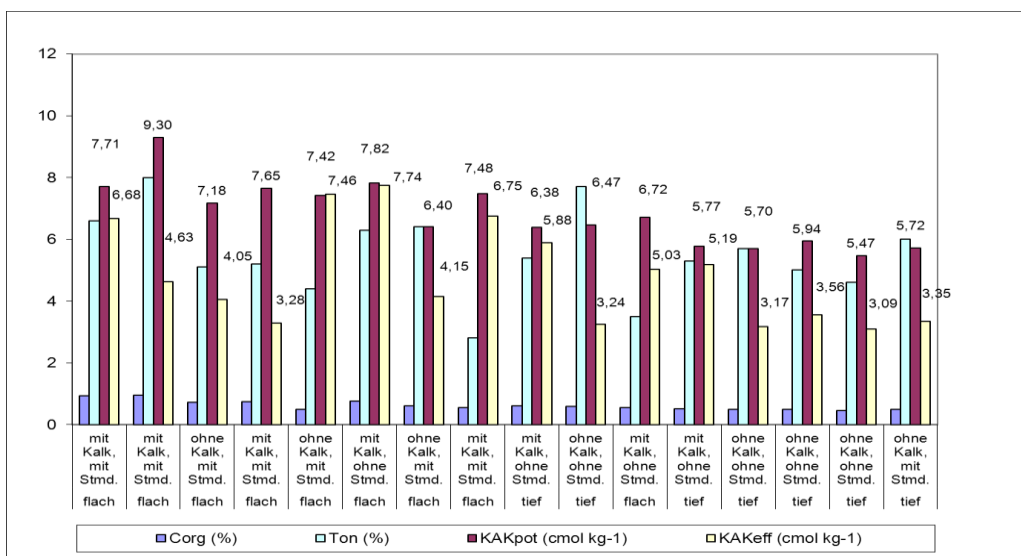


Abb. 35: Darstellung der KAKeff, KAKpot, Corg- und Tongehalte in flacher und tiefer Bodenbearbeitung in 20 - 25 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem; 2006)

In den folgenden Tabellen (Tab. 37 und Tab. 38) werden die Determinationskoeffizienten ( $R^2$ ) von Tongehalt (%) und  $C_{\text{org}}$ -Gehalt zu  $KAK_{\text{pot}}$  und  $KAK_{\text{eff}}$  für Berlin-Dahlem in 10 - 15 cm und 20 - 25 cm Bodentiefe dargestellt.

Tab. 37: Determinationskoeffizienten ( $R^2$ ) der linearen Regression (r) in 10 - 15 cm Bodentiefe in Berlin-Dahlem (2006)

Bodenparameter	$KAK_{\text{pot}}$ (cmol kg <sup>-1</sup> )	$KAK_{\text{eff}}$ (cmol kg <sup>-1</sup> )
Tongehalt (%)	0,06	0,04
$C_{\text{org}}$ -Gehalt (%)	0,70	0,07

Tab. 38: Determinationskoeffizienten ( $R^2$ ) der linearen Regression (r) in 20 - 25 cm Bodentiefe in Berlin-Dahlem (2006)

Bodenparameter	$KAK_{\text{pot}}$ (cmol kg <sup>-1</sup> )	$KAK_{\text{eff}}$ (cmol kg <sup>-1</sup> )
Tongehalt (%)	0,06	0,04
$C_{\text{org}}$ -Gehalt (%)	0,70	0,07

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Höhe der  $KAK_{\text{pot}}$  in den tonarmen Sandböden insbesondere durch den Gehalt an  $C_{\text{org}}$  bestimmt wird. In den Parzellen mit niedrigen pH-Werten kann die effektive KAK erheblich niedriger sein.

Auf den Versuchspartzen in Dedelow zeichnet sich ein ähnliches Bild der  $KAK_{\text{pot}}$ -Werte wie in der tiefen Bodenbearbeitungsvariante in Berlin Dahlem (Tab. 39) ab.

Tab. 39: Die  $KAK_{\text{pot}}$ -Werte (cmol kg<sup>-1</sup>) in verschiedenen Bodentiefen der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten (Dedelow, 2007)

Bodenbearbeitungsvarianten	$KAK_{\text{pot}}$ (cmol kg <sup>-1</sup> )	
	10 - 15 cm	20 - 25 cm
Direktsaat	5,71 a	6,53 a
Grubber (10 cm)	5,08 a	5,14 a
Grubber (15 cm)	5,54 a	6,72 a
Pflug (15 cm)	5,59 a	4,91 a
Pflug (25 cm)	5,80 a	5,76 a
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = %5)	1,18	3,42

Die potenzielle Austauschkapazität ist nach KA5 im mittleren Bereich zwischen  $4,91 \text{ cmol kg}^{-1}$  und  $6,72 \text{ cmol kg}^{-1}$  einzuordnen. Interessanterweise treten in der Parzelle mit einem auffallend hohen Tongehalt (M.-%) (Parzelle Nr. 4) in der Direktsaatvariante im Oberboden (10 - 15 cm)  $\text{KAK}_{\text{pot}}$ -Werte von  $6,36 \text{ cmol kg}^{-1}$  und im Unterboden (20 - 25 cm) von  $9,36 \text{ cmol kg}^{-1}$  auf. Die vollständige  $\text{KAK}_{\text{pot}}$ -Tabelle der einzelnen Parzellen ist dem Anhang (Tab. A4 bis Tab. A6) zu entnehmen.

## **4.5 Diskussion zu bodenchemischen Merkmalen**

In dieser Arbeit war es eine wichtige Zielstellung, die beobachteten bodenphysikalischen und –chemischen Eigenschaften sandiger Böden auf den zwei Dauerfeldversuchen in Berlin-Dahlem und in Dedelow zu untersuchen und sie mit bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnissen zu vergleichen.

Das Pflanzenwachstum hängt neben Bodenstruktureigenschaften entscheidend vom Zustand der chemischen Merkmale des Bodens ab und wird von der Nährstoffbereitstellung bzw. Nährstoffverfügbarkeit des Bodens sowie durch Düngung bestimmt. Die entscheidenden Unterschiede beider Bodenbearbeitungsverfahren liegen in Berlin-Dahlem im Übergang von flacher zu tiefer Bodenbearbeitung unter Berücksichtigung verschiedener Prüfglieder und in Dedelow von Direktsaat zu konventioneller Bodenbearbeitung. Die Bodenbearbeitung ist daher von großer Bedeutung, da sie für einen nachhaltigen Ackerbau eine wichtige Rolle spielt.

Die Untersuchungen des pH-Wertes im Boden am Standort Berlin-Dahlem zeigen bei flacher Bodenbearbeitung niedrigere Werte als in der tiefen Bodenbearbeitung bei gleicher Beprobungstiefe. Durch die tiefere Einbringung von organischem und mineralischem Dünger und die dadurch verursachte niedrigere Konzentration des Materials sind bei tiefer Bodenbearbeitung in den entsprechenden Tiefen höhere pH-Werte zu finden. KÖHN UND ELLMER (2009) weisen darauf hin, dass tiefes Pflügen bei Kalkmangel einer Bodenversauerung deutlich länger entgegenwirkt hat als die flache Bodenbearbeitung. Erst nach rund 40 Jahren ist eine Angleichung der Bodenreaktion zwischen tiefer und flacher Bodenbearbeitung im Kalkmangelbereich festgestellt worden.

Sowohl in 10 - 15 cm wie auch in 20 - 25 cm Bodentiefe war in Dedelow der niedrigste pH-Wert nach Direktsaat zu finden. Das kann die Folge von Verrottungsprozessen von zurückgelassenen Pflanzenresten mit entsprechender Wirkung auf den pH-Wert sein.

Die höchsten pH-Werte waren in beiden Bodenbearbeitungstiefen in der tief gepflügten Variante zu finden. Die pH-Werte für Grubber (15 cm) und Pflug (15 cm) lagen auf dem gleichen Niveau in beiden Tiefen.

In Berlin-Dahlem kommt es erwartungsgemäß bei flacher Bodenbearbeitung gegenüber der tiefen Bodenbearbeitung zu einer Anreicherung des Gesamtkohlenstoffgehaltes in 10 - 15 cm Bodentiefe. In den „mit Kalk und Stallmist“ gedüngten Parzellen wurde ein Höchstwert von 1,03 % ermittelt. Dies lässt sich aus den unterschiedlichen Bearbeitungstiefen und der Verteilung der Stallmistdüngung erklären. Durch die reduzierte Bodenbearbeitung wird nicht nur die organische Bodensubstanz in der oberen Bodentiefe akkumuliert, sondern es werden auch die Umsetzungsprozesse vermindert (CLAUPEIN, 1994). Demgegenüber wird bei der tiefen Bodenbearbeitung eine tiefere Bodenschicht mit organischer Bodensubstanz angereichert. In einer Bodentiefe von 20 - 25 cm bzw. in der Schicht, die bei der flachen Variante nicht bearbeitet wird, weisen die entsprechenden Prüfglieder tendenziell gering niedrigere Gesamtkohlenstoffgehalte im Gegensatz zur flachen Variante auf. Nach der Meinung von KRZYSCH ET AL. (1992) lässt sich in Berlin-Dahlem feststellen, dass die organische Düngung mit Stallmist den Boden insgesamt verbessert, indem der Anteil an organischer Substanz steigt, die mikrobielle Aktivität und der pH-Wert erhöht wird und das Wasserverbindungsvermögen dieses sandigen Bodens sich verbessert.

Bei den Untersuchungen zum Gesamtkohlenstoffgehalt bei differenzierter Bodenbearbeitung in Dedelow trat in der Direktsaat-Variante der niedrigste Wert bei 10 - 15 cm Bodentiefe auf. Dies kann daran liegen, dass bei allen anderen Bearbeitungsvarianten die Pflanzenrückstände nach der Ernte bearbeitungsbedingt in der entsprechenden Tiefe umgesetzt werden, während dies bei Direktsaat nicht der Fall ist. Die Gesamtkohlenstoffgehalte zwischen konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung wiesen in 10 - 15 cm Bodentiefe ähnliche Werte auf, während in der Pflug-Variante (15 cm) tendenziell höhere Werte ermittelt wurden. Es ist somit hier schwer abzuschätzen, ob konventionelle oder konservierende Bodenbearbeitung eine Wirkung auf höhere Gesamtkohlenstoffgehalte hat. Demgegenüber traten in 20 - 25 cm Tiefe geringfügig kleinere Gesamtkohlenstoffgehalte auf. Literaturangaben bestätigen, dass bei Einsatz konservierender Bodenbearbeitung auf leichten sandigen Böden trotz höherer CO<sub>2</sub>-Exhalation besonders in 0 - 5 cm und in abgeschwächter Form auch in 5 - 10 cm die organische Bodensubstanz angereichert wird (PRONIN, 2002). KÖRSCHENS (1997) weist darauf hin, dass der umsetzbare Kohlenstoff unter den durchschnittlichen Klimabedin-

gungen Europas in praxisüblichen ackerbaulichen Produktionssystemen zwischen 0,2 und 0,6 %  $C_{org}$ , der entsprechende Anteil im  $N_t$ -Gehalt zwischen 0,02 und 0,06 %  $N_t$  liegt.

Der Anteil des leicht umsetzbaren Kohlenstoffs ( $C_{hwl}$ -Gehalt) war wie bei der Differenzierung des Gesamtkohlenstoffgehaltes unter verschiedenen Bearbeitungstiefen und Prüfgliedern in Berlin-Dahlem nahezu wiederzufinden. Insgesamt kann für den Standort festgehalten werden, dass die  $C_{hwl}$ -Werte in den flach bearbeiteten Parzellen über die betrachtete 10 - 15 cm Bodenschicht nach SCHULZ (1997) „hohe“ und „sehr hohe“ Werte aufwiesen, während diese Werte in der tieferen Bodenbearbeitung als „mittel“ einzustufen sind. Nach einer Studie von LEINWEBER ET AL. (1995) zeigen sich deutliche Differenzierungen in den „mit und ohne organisch gedüngten“ Varianten, wobei die mit organischer Düngung einen höheren  $C_{hwl}$ -Gehalt im Vergleich zu den ungedüngten Varianten aufwiesen.

Unerwartet traten in den ausgelassenen Düngungsparzellen der flachen Bodenbearbeitung höhere  $C_{hwl}$ -Gehalte im Gegensatz zu den gedüngten Parzellen auf. Nach langjähriger Bodenbearbeitung liegen diese Werte auch in der 20 - 25 cm Bodenschicht tendenziell höher als bei flacher Bodenbearbeitung. Durch den tieferen Bodeneingriff des Pfluges mit 28 cm kommt es zur Vermischung des gesamten Pflughorizontes und die  $C_{hwl}$ -Gehalte sind gleichmäßiger verteilt als bei der flachen Variante.

Der Anstieg des leicht umsetzbaren Kohlenstoffs in einer Tiefe von 10 - 15 cm wird auch von PRONIN (2002) für die Variante mit konservierender Bodenbearbeitung in einer Tiefe bis 10 cm berichtet. Auch KRÜCK (1999) führt die Anreicherung von organischer Bodensubstanz bis in 15 cm Tiefe auf die konservierende Bodenbearbeitung zurück und schlussfolgert, dass eine größere Menge an Kohlenstoff im Boden gehalten wird als bei tieferer Bodenbearbeitung.

Im Vergleich zum Gehalt an organisch gebundenem Kohlenstoff bzw. Humus reagiert der Gehalt an heißwasserlöslichem Kohlenstoff ( $C_{hwl}$ ) empfindlicher auf die Düngung in der 10 - 15 cm Bodenschicht.

Die  $C_{hwl}$ -Gehalte der verschiedenen Bodenbearbeitungen in Dedelow spiegeln die gleichen Ergebnisse wie in Dahlem im „hoch bis sehr hohen Bereich“ wider. Auch hier traten in der unteren Bodentiefe (20 - 25 cm) deutlich niedrigere Werte als in der oberen Schicht auf und wurden als „mittel“ eingestuft. Interessanterweise zeigt sich der höch-

te  $C_{\text{hwl}}$ -Wert in 10 - 15 cm Bodentiefe bei der Grubber-Variante (10 cm) bzw. in der unbearbeiteten Bodenschicht und der niedrigste bei der Pflug-Variante (25 cm), für welche Tiefen die entsprechenden Gesamtkohlenstoffgehalte auf gleichem Niveau liegen. Hier wirkt sich der umsetzbare Kohlenstoffgehalt bei der Grubber-Variante (10 cm) bzw. bei der konservierenden Bodenbearbeitung im Vergleich zu der tieferen und zur Direktsaat mit höheren Werten aus. Bei gleichmäßiger Zufuhr von organischer Substanz können Unterschiede im Humusniveau ihre Ursachen in den Bodeneigenschaften bzw. Bodenart, pH-Wert, Bodendurchlüftung und -feuchte haben (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2010).

Insgesamt kann gesagt werden, dass in der flachen Bodenbearbeitung, insbesondere in der 10 - 15 cm Bodenschicht, der Gesamtkohlenstoffgehalt und der leicht umsetzbare Kohlenstoff höhere Anteile aufweisen.

Ein weiterer Parameter, welcher im Verhältnis zur organischen Substanz steht, ist der Gesamtstickstoffgehalt ( $N_t$ ). Bei konservierende Bodenbearbeitung werden die Ernterückstände langfristig im Boden bewahrt im Gegensatz zur konventionellen Bodenbearbeitung, was für die N-Mineralisierung von großer Bedeutung ist, da die Mineralisierung langsamer und kontinuierlicher stattfindet.

Die Untersuchungen zum Gesamtstickstoffgehalt in Berlin-Dahlem haben gezeigt, dass Stallmistdüngung die Stickstoffgehalte erhöht und in Kombination mit der Pflugbearbeitung zu beträchtlichen Kombinationswirkungen führt. Die Kalkdüngung wirkt sowohl bei Stallmistdüngung als auch bei unterlassener Stallmistdüngung fördernd auf den Gesamtstickstoffgehalt des Bodens in 10 - 15 cm und 20 - 25 cm Bodentiefe der beiden Bodenbearbeitungssysteme. Die Untersuchungen von KRZYSCH (1992) belegen, dass auf der langjährigen Versuchsanlage DIII (Berlin-Dahlem) der Gesamtkohlenstoff- und Gesamtstickstoffgehalt im Boden von 1988 bis 1990 durch die Stallmistdüngung deutlich erhöht wurde. Auch wurden damals höhere Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte des Bodens in der Getreidefolge festgestellt, allerdings nur bei den gekalkten Varianten. Bei den ungekalkten Varianten waren diese Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte nicht zu finden.

Der Vergleich der Gesamtstickstoffgehalte aller Bodenbearbeitungsvarianten in Dedelow weist in 10 - 15 cm Bodentiefe annähernd die gleichen Ergebnisse auf. Auch in 20 - 25 cm Tiefe sind diese Ergebnisse statistisch nicht gesichert. Das liegt daran,

dass alle Bodenbearbeitungsverfahren in den entsprechenden Tiefen gleichmäßige Gesamtkohlenstoffgehalte beinhalten. Betrachtet man die Direktsaat-Variante mit dem geringsten Anteil an Gesamtkohlenstoff, so kann geschlussfolgert werden, dass der Gesamtstickstoffgehalt auch am geringsten ist. Obwohl in den jeweiligen Bodenbearbeitungsverfahren die  $N_t$ -Gehalte stets auf dem gleichen Niveau liegen, ist es für das Pflanzenwachstum von großer Bedeutung den Stickstoffaustrag minimal zu halten. HANSEN UND DJURHUUS (1997) weisen in einer Studie darauf hin, dass bei lehmigem Sand bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung ein Stickstoffaustrag bei konventioneller Bodenbearbeitung von  $76 \text{ kg N ha}^{-1}$  im Herbst gemessen wurde, während bei konservierender Bodenbearbeitung dieser Verlust nur  $35 \text{ kg}^{-1} \text{ N ha}^{-1}$  betrug.

Im Gegensatz zum  $N_t$ -Gehalt weist der heißwasserlösliche Stickstoffgehalt ( $N_{hwl}$ -Gehalt) eine umgekehrte Wechselwirkung in 10 - 15 cm Bodentiefe der tiefen Bearbeitung auf. Interessant ist der Gehalt an heißwasserlöslichem Stickstoff ( $N_{hwl}$ ), welcher den potenziell nachlieferbaren organisch gebundenen Stickstoff im Boden repräsentiert und höhere Werten in dieser Tiefe aufweist. Eine bedeutende Fragestellung hinsichtlich des Gehaltes an  $N_{hwl}$  ist die Fragestellung der Stickstoffverlagerung. Anhand dieses Parameters können jedoch keine Aussagen getroffen werden, da es nicht den Stickstoffgehalt widerspiegelt, der sich in der Bodenlösung befindet.

Der Humus ist die Stickstoffquelle des Bodens. Durch mikrobiellen Abbau wird Stickstoff aus seiner organischen Bindung freigesetzt (mineralisiert) und wird damit pflanzenverfügbar. Je stickstoffreicher die organische Substanz ist, d.h. je enger das Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis (C/N) ist, desto höher ist die Humusqualität zu bewerten. Durch den Abbau im Boden verengt sich das C/N-Verhältnis. Es nähert sich allmählich einem Wert von 8 bis 10:1, wie er für Humus der meisten landwirtschaftlich genutzten Böden typisch ist (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2010).

Die C/N-Verhältnisse lagen in beiden Bodenbearbeitungstiefen unter den verschiedenen Prüfgliedern, in 10 - 15 cm Bodentiefe durchschnittlich um den Wert 14. Dieses C/N-Verhältnis wird nach KA5 als „hq4“ bezeichnet und kennzeichnet damit hohe Umsatzbedingungen. Gering günstigere C/N-Verhältnisse traten in der unteren Bodenschicht in beiden Bodenbearbeitungsverfahren auf.

Am Standort Dedelow weist das C/N-Verhältnis im Vergleich zu Berlin-Dahlem mit geringeren Proportionen ein günstigeres Verhältnis auf. In der Oberkrume zeigt die Di-

rektsaat-Variante ein statistisch gesichertes Ergebnis. Die übrigen Bodenbearbeitungsverfahren wiesen höhere Werte auf, was auf einen geringeren Stickstoffgehalt in dieser Tiefe schließen lässt. Der geringere C/N-Wert in der Direktsaat-Variante bzw. der höhere Stickstoffgehalt kann durch das Belassen der organischen Düngung bzw. durch das Stroh und die Auswirkungen der Verrottungsprozesse auf den Oberboden erklärt werden. In der Bearbeitungstiefe 20 - 25 cm wurden zwischen den Bearbeitungsverfahren kaum C/N-Verhältnis-Unterschiede erzielt.

Wie für die überwiegend tonarmen Sandböden zu erwarten, ergibt sich auf den Versuchspartzen in Berlin-Dahlem zwischen der  $KAK_{pot}$  und dem Tongehalt ein schwacher Zusammenhang, während die  $KAK_{pot}$  insbesondere in den flachen Bodenbearbeitungsflächen in beiden Beprobungstiefen tendenziell höhere Werte aufweist. Aufgrund der höheren Humuswerte sowohl in der oberen als auch in der unteren Bodenschicht weist die  $KAK_{pot}$  im Vergleich zu der tiefen Bodenbearbeitung höhere Werte auf. Dies unterstreicht die Bedeutung der organischen Substanz auf die höheren  $KAK_{pot}$ -Werte.

Auf dem Versuchsfeld in Dedelow variierten die  $KAK_{pot}$ -Werte nicht stark voneinander. Sowohl in der Oberkrume als auch in der Unterkrume konnten keine statistisch gesicherten Ergebnisse festgestellt werden, welche auf die Gesamtkohlenstoffgehalte zurückzuführen sind.

## **4.6 Pflanzenbauliche Ergebnisse**

Die pflanzenbaulichen Ergebnisse der beiden Versuchsstandorte Berlin-Dahlem und Dedelow werden zunächst getrennt voneinander angegeben. Für Berlin-Dahlem werden der Ertrag und die Ertragskomponenten für Hafer (2006) und Winterweizen (2007) und für Dedelow der Ertrag für den Körnermais (2007) dargestellt.

### **4.6.1 Ertrag von Hafer**

Im Jahr 2006 stand im Dauerfeldversuch Bodennutzung DIII Hafer als Prüfpflanze. Die erzielten Erträge sind in der Tab. 40 dargestellt.



Tab. 40: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Kornertrag (dt ha<sup>-1</sup> ; 86 % TS) von Hafer (2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	24,9 b	27,7 b
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	28,7 b	29,2 b
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	23,7 b	25,8 b
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	15,3 a	23,7 b
LSD <sub>A*B*C</sub> (α= 5%)= 6,4		

Die Kornerträge von Hafer variierten in Abhängigkeit der Düngung und der Bodenbearbeitungstiefen stark zwischen 15,3 und 29,2 dt ha<sup>-1</sup>. Im Vergleich mit den langjährigen Mittelwerten des DIII wurden von 1969 bis 2002, abgesehen von den ungedüngten flach bearbeiteten Parzellen, nahezu die gleichen Kornertragswerte erzielt. Die langjährigen Mittelwerte in den ungedüngten flach bearbeiteten Parzellen betrugen im Mittel 27,44 dt ha<sup>-1</sup>.

Bis auf die Variante „ohne Kalk und Stallmistdüngung“ wurden in diesem Parameter in der flachen Bodenbearbeitung geringere Kornerträge erzielt, die allerdings nicht signifikant waren. Der höchste Ertrag wurde in der tiefen Bodenbearbeitung in der Variante „mit Kalk- und ohne Stallmistdüngung“ gemessen, wobei der Unterschied zu der flachen Bodenbearbeitungstiefe gering blieb. Ein auffallend großer Unterschied konnte in der Variante „ohne Kalk- und Stallmistdüngung“ beobachtet werden. Während hier nach einer langjährig unterlassenen Düngung in der tiefen Bodenbearbeitung noch annähernd 24 dt ha<sup>-1</sup> Kornertrag erreicht wurden, lag der Ertrag bei flacher Bodenbearbeitung bei 15,3 dt ha<sup>-1</sup>.

#### 4.6.2 Ertragsstruktur von Hafer

Die Bestandesdichte wurde durch die Düngung und Bodenbearbeitungstiefen unterschiedlich beeinflusst (Tab. 41).

Tab. 41: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf Bestandesdichte (Rispen je m<sup>2</sup>) von Hafer (2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	383 c	332 a
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	375 bc	335 a
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	353 abc	385 c
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	340 ab	323 a
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = 5%)= 35,42		

Die Werte variierten zwischen 323 und 383 Rispen m<sup>-2</sup>. Die höchsten Bestandesdichten wurden in der flachen Bodenbearbeitung bei der Variante „mit Kalk- und Stallmistdüngung“ (383 Rispen m<sup>-2</sup>) und in der tiefen Bodenbearbeitung in der Variante „ohne Kalk- und mit Stallmistdüngung“ (385 Rispen m<sup>-2</sup>) erfasst. Obwohl die Abnahme der Bestandesdichten in den geprüften Varianten der flachen Bodenbearbeitung deutlich zu sehen ist, war diese Situation bei der tiefen Variante nicht zu erkennen. Nach einer Studie von KRZYSCH ET AL. (1992) reagiert der Hafer beim Parameter Bestandesdichte nicht auf Phosphat- und Stallmistgabe und hat sogar bei unterlassener Kalkdüngung eine höhere Rispenzahl pro m<sup>2</sup>.

Die Tausendkorngewichte zeigten in den unterschiedlichen Varianten Werte zwischen 24,60 und 28,36 g (Tab. 42).

Tab. 42: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf das Tausendkorngewicht (g) von Hafer (2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	26,4 abc	27,1 bc
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	27,0 bc	26,9 bc
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	28,4 c	27,3 bc
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	24,6 a	26,2 ab
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = 5%)= 1,9		

Im Vergleich zum Korntrag zeigte sich im Tausendkorngewicht ein ähnliches Bild. Hier ist allerdings auch zu erwähnen, dass das Tausendkorngewicht in der flachen Va-

riante bei unterlassener Düngung nicht den Werten der Kornerträge entspricht. Tendenzielle Unterschiede ergaben sich zwischen den Bodenbearbeitungstiefen.

#### 4.6.3 Qualität von Hafer

Die Hektolitergewichte für den Hafer variierten zwischen 44,50 und 48,30 kg hl<sup>-1</sup> (Tab. 43).

Tab. 43: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf das Hektolitergewicht (kg hl<sup>-1</sup>) von Hafer (2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	45,61 ab	45,83 ab
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	47,16 bc	46,67 abc
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	48,30 c	47,16 bc
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	44,50 a	47,67 bc
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = 5%)= 2,30		

Zwischen den unterschiedlichen Bodenbearbeitungstiefen ergaben sich keine Unterschiede mit Ausnahme der flachen Bodenbearbeitungstiefe bei unterlassener Düngung.

Die Siebfraktionierung zeigte geringe Unterschiede zwischen den geprüften Bodenbearbeitungstiefen. In der tiefen Bodenbearbeitung – außer bei unterlassener Düngung – wurden tendenziell höhere Anteile an Körnern < 2,0 mm im Vergleich zur flachen Bodenbearbeitung gemessen (Abb. 36).

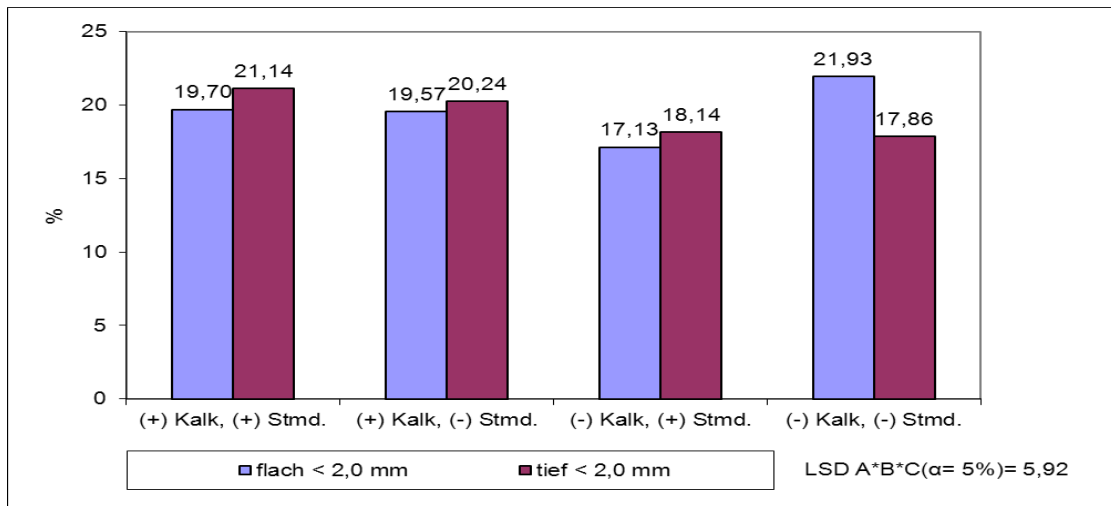


Abb. 36: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung < 2,0 mm von Hafer (2006)

In der flachen und tiefen Bodenbearbeitung blieben die Anteile in allen Varianten weitgehend konstant.

In der Siebfraktionierung 2,0 - 2,2 mm konnten zwischen der flachen und tiefen Bodenbearbeitung (Abb. 37) keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

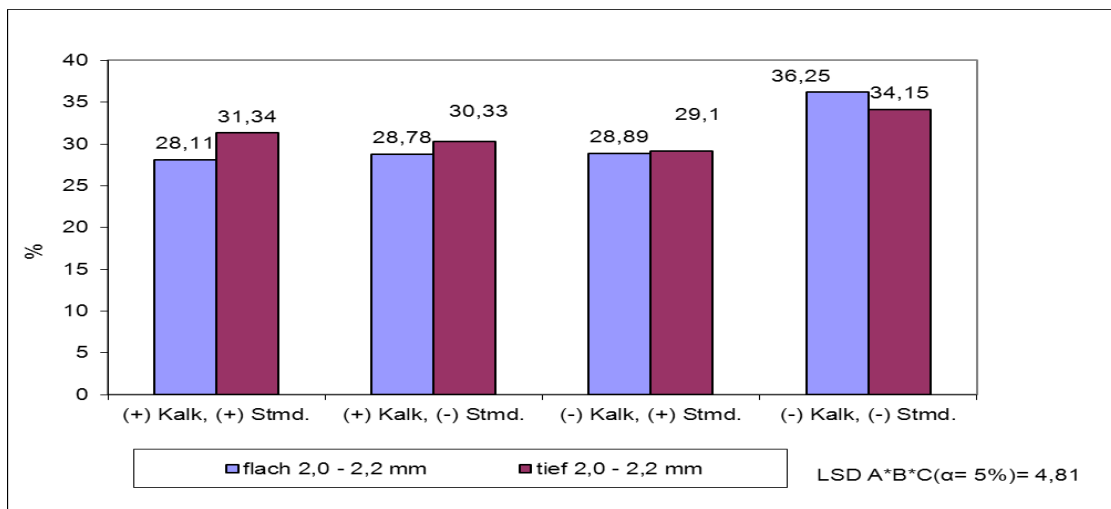


Abb. 37: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung 2,0 – 2,2 mm von Hafer (2006)

Im Allgemeinen blieb der Anteil in dieser Siebgröße abgesehen von der unterlassenen Düngung nahezu im gleichen Bereich. In der unterlassenen Düngungsvariante beider Bodenbearbeitungstiefen wurden statistisch gesicherte höhere Anteile an Körnern erfasst.

In der 2,2 - 2,5 mm Fraktionierung blieben die Unterschiede zwischen der flachen und tiefen Bodenbearbeitung wie auch in der 2,0 – 2,2 mm Fraktion annähernd gleich (Abb. 38).

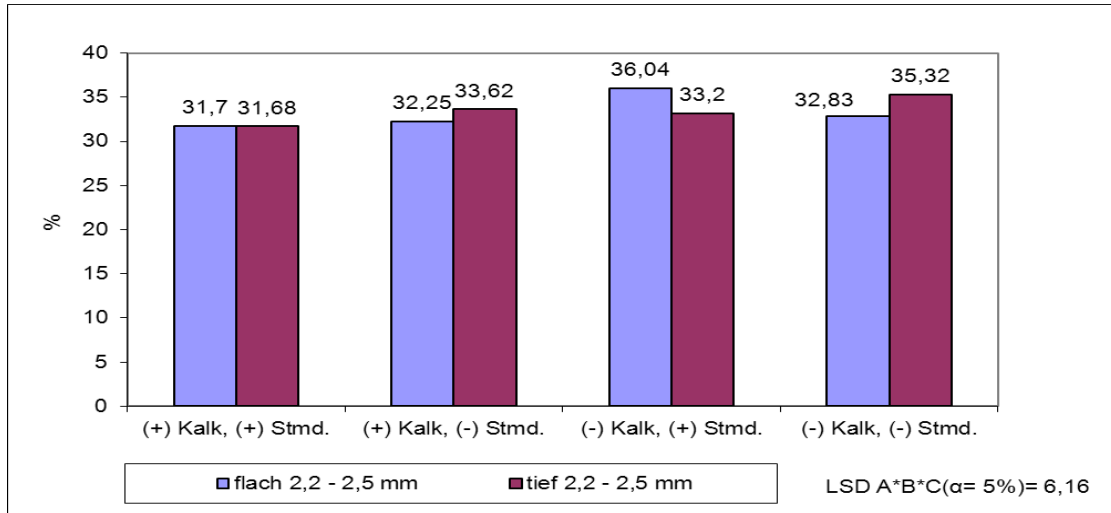


Abb. 38: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung 2,2 – 2,5 mm von Hafer (2006)

Es konnten keine signifikant gesicherten Unterschiede sowohl innerhalb als auch zwischen den Bodenbearbeitungstiefen festgestellt werden.

In der Siebfraktionierung 2,5 - 2,8 mm konnten zwischen beiden Bodenbearbeitungsvarianten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden (Abb. 39).

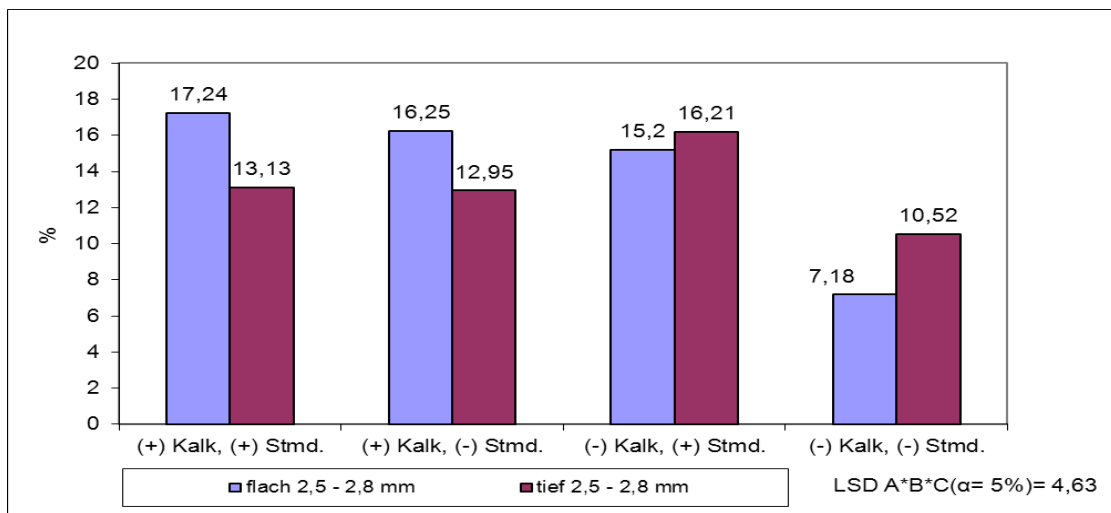


Abb. 39: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung 2,5 – 2,8 mm von Hafer (2006)

Demgegenüber wurden in beiden Bodenbearbeitungstiefen höhere Korngrößenanteile als bei unterlassener Düngung erzielt. Der höchste Anteil an dieser Fraktionierung wurde in der flachen Variante bei Zufuhr von beiden Düngungsmaterialien erreicht.

Ein wesentlich kleinerer Anteil an Körnern trat in der Siebfractionierung 2,8 bis 3,0 mm auf (Abb. 40).

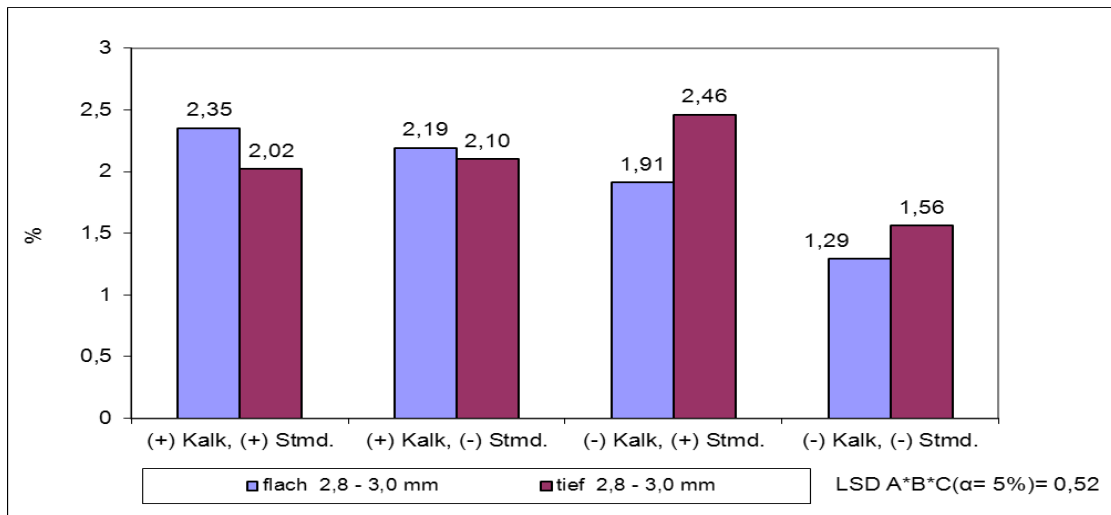


Abb. 40: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung 2,8 – 3,0 mm von Hafer (2006)

Es wurden zwischen beiden Bodenbearbeitungstiefen keine signifikanten Unterschiede außer bei der Variante „ohne Kalk- und mit Stallmisdüngung“ festgestellt. Der kleinste Anteil an der Korngröße von > 3,0 mm zeigte sich in dieser Fraktionierung (Abb. 41).

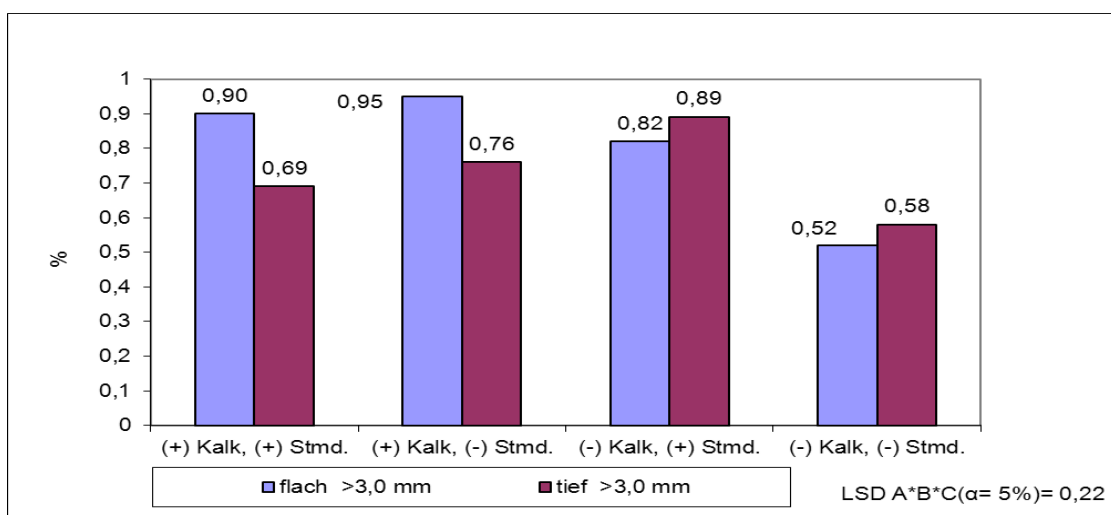


Abb. 41: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung > 3,00 mm von Hafer (2006)

Im Allgemeinen blieb der Anteil in dieser Siebgröße nahezu im gleichen Bereich wie in der vorherigen Siebfraktion.

Die Rohproteingehalte variierten zwischen den geprüften Varianten zwischen 13,09 und 15,25 % (Tab. 44).

Tab. 44: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf Rohproteingehalt (%) von Hafer (2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	14,19 ab	13,09 a
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	13,34 ab	13,11 a
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	13,36 ab	14,20 ab
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	15,25 b	13,11 a
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = 5%) = 2,05		

Zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten wurden keine statistisch gesicherten Unterschiede festgestellt. Ein bemerkenswerter Anstieg des Rohproteingehaltes war in der flachen Bodenbearbeitung in der unterlassenen Düngungsvariante zu beobachten. Diese Erhöhung des Proteingehaltes ist nicht auf die Düngung, sondern auf den Verdünnungseffekt zwischen Kornertrag und Proteingehalt zurückzuführen. Der geringe Ertrag bei unterlassener Düngung spiegelte sich in hohen Proteingehalten wider.

Der Ölgehalt von Hafer zeigte den niedrigsten Anteil sowohl in der flachen als auch in der tiefen Bodenbearbeitung in der Variante „mit Kalk- und mit Stallmistdüngung“ mit einem statistisch gesicherten Wert. Jedoch konnten zwischen beiden Bodenbearbeitungstiefen keine sicheren Unterschiede festgestellt werden (Tab. 45).

Tab. 45: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Ölgehalt (%) von Hafer (2006)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	3,74 a	3,94 ab
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	4,08 bc	4,33 c
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	4,07 bc	3,97 ab
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	4,16 bc	4,33 c
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = 5%) = 0,27		

Der höchste Anteil in der flachen Bodenbearbeitung zeigte sich bei der unterlassenen Düngungsvariante, welche auch für die tiefere Variante der Fall war. Dennoch wurde in dieser Bodenbearbeitungstiefe in der „mit Kalk- und ohne Stallmistdüngung“-Variante auch der gleiche Wert festgestellt.

#### 4.6.4 Ertrag von Winterweizen

Für Winterweizen sind im Versuchsjahr 2007 der Ertrag und die Ertragskomponenten untersucht worden.

Unter dem Einfluss von Düngung und unterschiedlichen Bodenbearbeitungstiefen wurden Keimdichten zwischen 203 und 384 Pflanzen je m<sup>2</sup> erzielt (Tab. 46).

Tab. 46: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Keimdichte (Pflanzen je m<sup>2</sup>) von Winterweizen (2007)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	384 c	310 b
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	373 c	308 b
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	293 b	269 b
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	203 a	262 b
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = 5%) = 50		

Bis auf die Variante „ohne Kalk- und Stallmistdüngung“ konnten in der flachen Bodenbearbeitungstiefe höhere Keimdichten gemessen werden. Während die höchsten



Keimdichten in beiden Bodenbearbeitungstiefen in den Varianten „mit Kalk- und mit Stallmistdüngung“ gemessen wurden, zeigten die Varianten „ohne Kalk- und ohne Stallmistdüngung“ die geringsten Werte. Allerdings ist zu erwähnen, dass die Unterschiede in den Varianten in der tiefen Bodenbearbeitung nicht signifikant waren. Insbesondere wurde in beiden Bodenbearbeitungstiefen in den Varianten „ohne Kalk“ ein deutlicher Abfall der Keimdichten beobachtet.

Die Kornträge variierten in Abhängigkeit der Düngung und der Bodenbearbeitungstiefe sehr stark zwischen 1,4 und 58,4 dt ha<sup>-1</sup> (Tab. 47).

Tab. 47: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefe auf den Korntrag (dt ha<sup>-1</sup>; 86 % TS) von Winterweizen (2007)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	58,4 e	56,2 de
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	54,1 cde	46,2 c
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	50,9 cde	46,9 cd
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	1,4 a	19,5 b
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = 5%)= 9,7		

Im Vergleich mit den langjährigen Mittelwerten des DIII wurden von 1968 bis 2005, abgesehen von den ungedüngten flach und tief bearbeiteten Parzellen, höhere Kornträge von Winterweizen erfasst. Als extreme Variante für das Jahr 2007 ist hier mit 1,4 dt ha<sup>-1</sup> die ungedüngte flache Variante zu bewerten. Außerdem wies auch die ungedüngte tiefere Variante mit 19,5 dt ha<sup>-1</sup> einen niedrigeren Ertragswert im Vergleich zu den langjährigen Mittelwerten auf. Der langjährige mittlere Korntrag in dieser Variante beträgt 25,13 dt ha<sup>-1</sup>.

Bis auf die Variante „ohne Kalk und ohne Stallmistdüngung“ wurden in diesem Parameter in der flachen Bodenbearbeitung höhere Kornträge erzielt. Allerdings konnten die Unterschiede nicht statistisch gesichert werden. Der höchste Ertrag wurde in der flachen Bodenbearbeitungsvariante im Prüfglied „mit Kalk- und Stallmistdüngung“ gemessen, wobei zu erwähnen ist, dass der Unterschied zu der tiefen Bodenbearbeitungstiefe gering blieb. Interessant ist, dass bei unterlassener Kalkdüngung durch Zufuhr von Stallmistdüngung im Vergleich zu Kalkdüngung und unterlassener Stallmistdüngung die Ergebnisse statistisch keine Unterschiede zeigten. Ein bemerkenswert

großer Unterschied konnte in der Variante „ohne Kalk- und Stallmistdüngung“ beobachtet werden. Während hier nach einer langjährig unterlassenen Düngung in der tiefen Bodenbearbeitung noch annähernd 20 dt ha<sup>-1</sup> Kornertrag erzielt wurden, ist in der flachen Bodenbearbeitung nahezu kein Ertrag (1,4 dt ha<sup>-1</sup>) mehr gebildet worden. Nur in dieser Variante konnte sich die tiefe Bodenbearbeitung im Vergleich zur flachen Bodenbearbeitung behaupten.

Der Einfluss der Düngung in den unterschiedlichen Bodenbearbeitungstiefen auf den Strohertrag zeigte weitgehend ähnliche Effekte wie beim Kornertrag (Tab. 48).

Tab. 48: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Strohertrag (dt ha<sup>-1</sup> TM) von Winterweizen (2007)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	73,8 e	64,7 de
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	69,3 e	45,2 c
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	57,0 d	57,3 d
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	1,6 a	23,3 b
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = 5%)= 10,27		

Die Stroherträge zeigten in den unterschiedlichen Düngungs- und Bodenbearbeitungstiefen Ergebnisse zwischen 1,6 dt ha<sup>-1</sup> TM und 73,8 dt ha<sup>-1</sup> TM und waren somit deutlich höher als die Kornerträge. Ein Unterschied zum Kornertrag zeigte sich zwischen den Varianten „mit Kalk- und ohne Stallmistdüngung“ und „ohne Kalk- und mit Stallmistdüngung“, indem in der tiefen Bodenbearbeitung in der Variante „ohne Kalk- und mit Stallmistdüngung“ ein signifikanter Mehrertrag im Vergleich zu „mit Kalk- und ohne Stallmistdüngung“ gemessen wurde. Auch im Strohertrag ergaben sich wie beim Kornertrag große Differenzen zwischen den Bodenbearbeitungstiefen in der Variante „ohne Kalk- und Stallmistdüngung“.

#### 4.6.5 Ertragsstruktur von Winterweizen

Die Bestandesdichte wurde durch die Düngung und Bodenbearbeitungstiefen unterschiedlich beeinflusst (Tab. 49).

Tab. 49: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Bestandesdichte (Ähren pro m<sup>2</sup>) von Winterweizen (2007)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	503 d	394 c
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	485 d	364 c
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	368 c	351 c
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	137 a	269 b
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = 5%)= 47,6		

Die Werte variierten zwischen 137 und 503 Ähren pro m<sup>2</sup>. Die höchsten Bestandesdichten wurden wie in der Keimdichte in beiden Bodenbearbeitungstiefen in der Variante „mit Kalk- und mit Stallmistdüngung“ erfasst. Ähnlich wie in der Keimdichte ergaben sich auch hier die höheren Werte in der flachen Bodenbearbeitung. Die Abnahme der Bestandesdichten in den geprüften Varianten war in der flachen Bodenbearbeitung deutlich größer als in der tiefen Bodenbearbeitung. Vor allem reduzierten sich die Bestandesdichten in den Varianten „ohne Kalkdüngung“ im Vergleich zu „ohne Stallmistdüngung“.

Die starken Abnahmen der Bestandesdichten in den Varianten „ohne Kalkdüngung“ konnten durch die Zufuhr von Stallmistdüngung bis zu einem bestimmten Grad kompensiert werden, insbesondere in der tiefen Bodenbearbeitung.

Die Anzahl von Körnern je Ähre ist bedeutsam für hohe Erträge (DIEPENBROCK ET AL., 2009). Die Kornzahlen variierten in den unterschiedlichen Varianten zwischen 17 und 40 und somit in einem großen Bereich. Generell wurden in den tiefen Varianten höhere Werte gemessen (Tab. 50).

Tab. 50: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Kornzahl je Ähre von Winterweizen (2007)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	31,3 b	40,3 c
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	29,3 b	33,9 bc
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	33,2 b	32,6 b
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	- <sup>1)</sup>	17,0 a
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = 5%)= 6,5		

<sup>1)</sup> Analyse konnte wegen fehlenden Materials nicht durchgeführt werden

Die Versuchsergebnisse ergaben dennoch ein unklares Bild. Abgesehen von den Varianten ohne jegliche Düngung konnten bis auf die hohen Kornzahlen in der tiefen Bodenbearbeitungsvariante „mit Kalk- und Stallmistdüngung“ statistisch keine Unterschiede festgestellt werden.

Die Tausendkorngewichte zeigten in den unterschiedlichen Varianten Werte zwischen 31,3 und 40,9 g (Tab. 51).

Tab. 51: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf das Tausendkorngewicht (g) von Winterweizen (2007)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	37,7 b	35,6 b
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	37,1 b	36,0 b
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	40,9 c	37,9 b
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	- <sup>1)</sup>	31,3 a
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = 5%)= 2,9		

<sup>1)</sup> Analyse konnte wegen fehlenden Materials nicht durchgeführt werden

Im Vergleich zum Ertrag zeigte sich im Tausendkorngewicht ein umgekehrtes Bild. Während die Kornerträge von der Variante „Kalk- und Stallmistdüngung“ zur Variante „unterlassene Kalk- und Stallmistdüngung“ abnahmen, konnten in den Tausendkorngewichten - wenn auch nicht immer statistisch gesichert - Zunahmen festgestellt werden. Hier ist allerdings zu erwähnen, dass die Werte für das Tausendkorngewicht in

der unterlassenen Düngung nicht zu berücksichtigen sind. Tendenzielle Unterschiede ergaben sich zwischen den Bodenbearbeitungstiefen. Die Tausendkorngewichte lagen in der flachen Bodenbearbeitung höher als in der tiefen Bodenbearbeitung, wobei in der Variante „ohne Kalk- und mit Stallmistdüngung“ signifikante Unterschiede erfasst werden konnten. Abgesehen von der unterlassenen Düngung konnten im Vergleich zu den Varianten „mit Kalkdüngung“ in der Variante „ohne Kalkdüngung“ größere Zunahmen in den Tausendkorngewichten erzielt werden.

#### 4.6.6 Qualität von Winterweizen

Die Hektolitergewichte für den Winterweizen lagen in einem mittleren Bereich und variierten zwischen 74,7 und 77,2 kg hl<sup>-1</sup> (Tab. 52).

Tab. 52: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf das Hektolitergewicht (kg hl<sup>-1</sup>) von Winterweizen (2007)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	75,4 a	75,1 a
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	75,1 a	75,5 a
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	77,0 b	77,2 b
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	- <sup>1)</sup>	74,7 a
LSD <sub>A*B*C</sub> (α= %5)= 1,0		

<sup>1)</sup> Analyse konnte wegen fehlenden Materials nicht durchgeführt werden

Zwischen den unterschiedlichen Bodenbearbeitungstiefen ergaben sich keine Unterschiede. Demgegenüber konnten Effekte infolge der Düngungsarten festgestellt werden. Während die Varianten „mit Kalkdüngung“ in der flachen sowie in der tiefen Bodenbearbeitung keine nennenswerten Unterschiede hervorbrachten, war in der Variante „ohne Kalkdüngung“ eine signifikante Steigerung in den Hektolitergewichten festzustellen. Dies konnte in beiden Bodenbearbeitungstiefen beobachtet werden. In den Varianten „mit Kalkdüngung“ konnten keine Effekte der Stallmistdüngung in beiden Bodenbearbeitungstiefen verzeichnet werden, während in den Varianten „ohne Kalkdüngung“ in der unterlassenen Stallmistdüngung im Vergleich zur Variante „mit Stallmistdüngung“ eine signifikante Abnahme der Hektolitergewichte zu verzeichnen war. Die angesprochene Abnahme konnte allerdings durch das geringe Probenmaterial nur in der tiefen Bodenbearbeitung beobachtet werden.

Die Siebfraktionierung zeigte große Unterschiede zwischen den geprüften Bodenbearbeitungstiefen. In der tiefen Bodenbearbeitung wurden deutlich höhere Anteile an Körnern < 2,0 mm im Vergleich zur flachen Bodenbearbeitung gemessen (Abb. 42).

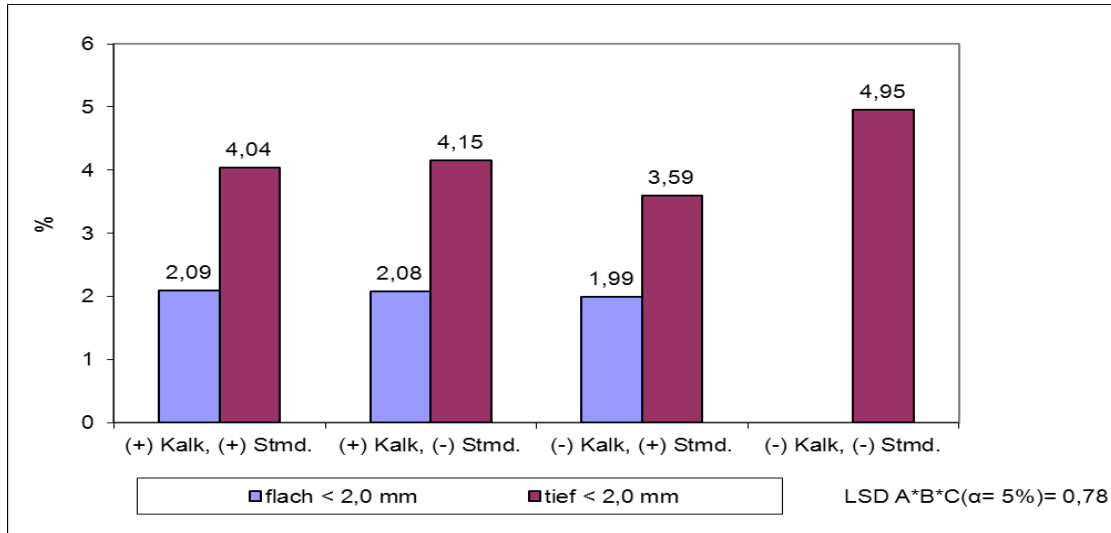


Abb. 42: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung < 2,0 mm von Winterweizen (2007)

In der flachen Bodenbearbeitung blieben die Anteile in allen Varianten weitgehend konstant, was auch bis auf die Variante „unterlassene Düngung“ auf die tiefe Bodenbearbeitung zutrifft.

In der Siebfraktionierung 2,0 - 2,2 mm reduzierten sich die Unterschiede abgesehen von der unterlassenen Düngung zwischen der flachen und tiefen Bodenbearbeitung (Abb. 43), so dass keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten.

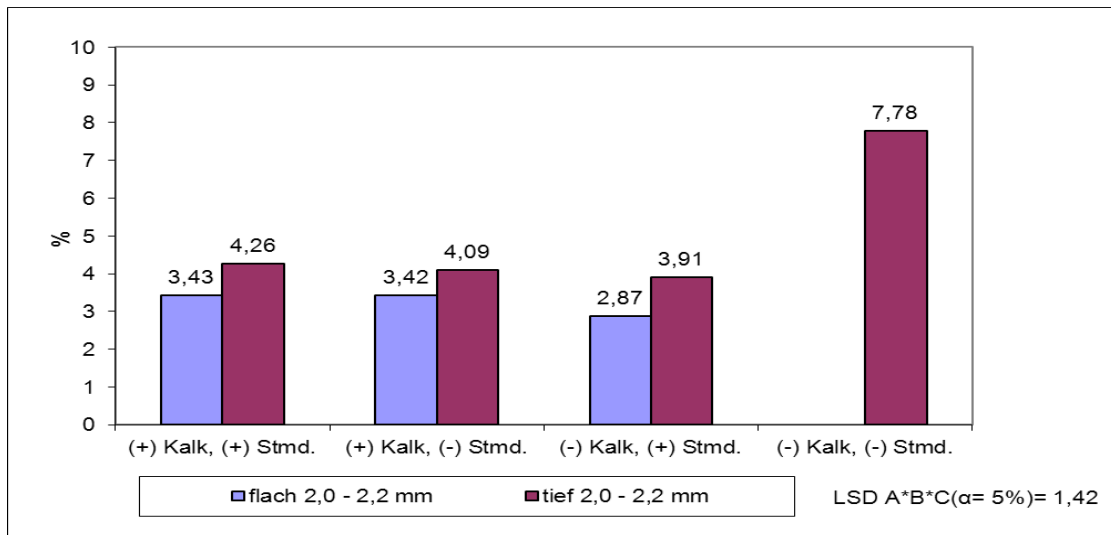


Abb. 43: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung 2,0 - 2,2 mm von Winterweizen (2007)

Im Allgemeinen blieb der Anteil in dieser Siebgröße nahezu im gleichen Bereich wie in der vorherigen Siebfraktion. Auch in den vorherigen Fraktionen wurden in dieser Variante stets höhere Anteile und somit kleinere Körner erfasst.

In der größeren Fraktionierung (2,2 - 2,5 mm) blieben die Unterschiede zwischen der flachen und tiefen Bodenbearbeitung wie auch in den kleineren Fraktionen annähernd gleich (Abb. 44).

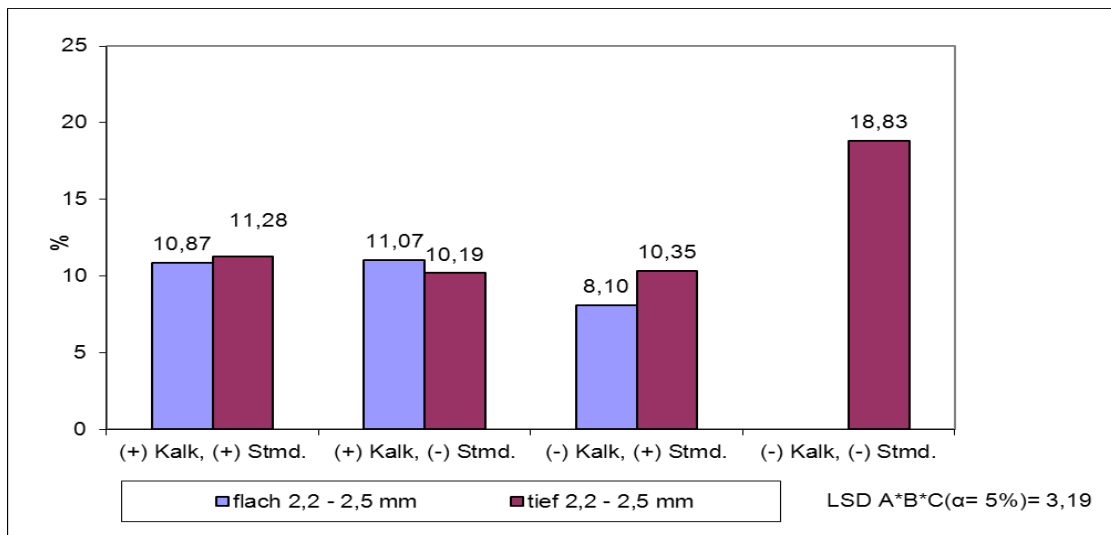


Abb. 44: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung 2,2 - 2,5 mm von Winterweizen (2007)

Allerdings konnten in dieser Fraktion bis auf die unterlassene Düngung um die 8 bis 11 % Körner gefunden werden. Interessant sind die nahezu doppelt so hohen Anteile in der unterlassenen Düngung bei tiefer Bodenbearbeitung.

In den Varianten „mit Kalkdüngung“ konnten in der flachen Bodenbearbeitung höhere Anteile gemessen werden, wobei die Unterschiede statistisch nicht gesichert sind. In der Variante „ohne Kalk- aber mit Stallmisdüngung“ konnte demgegenüber ein signifikant höherer Anteil in der tiefen Bodenbearbeitung festgestellt werden. Diese Siebgröße erbrachte in allen Düngungsvarianten geringere Anteile als in der von > 3,0 mm und 2,8 bis 3,0 mm (Abb. 45).

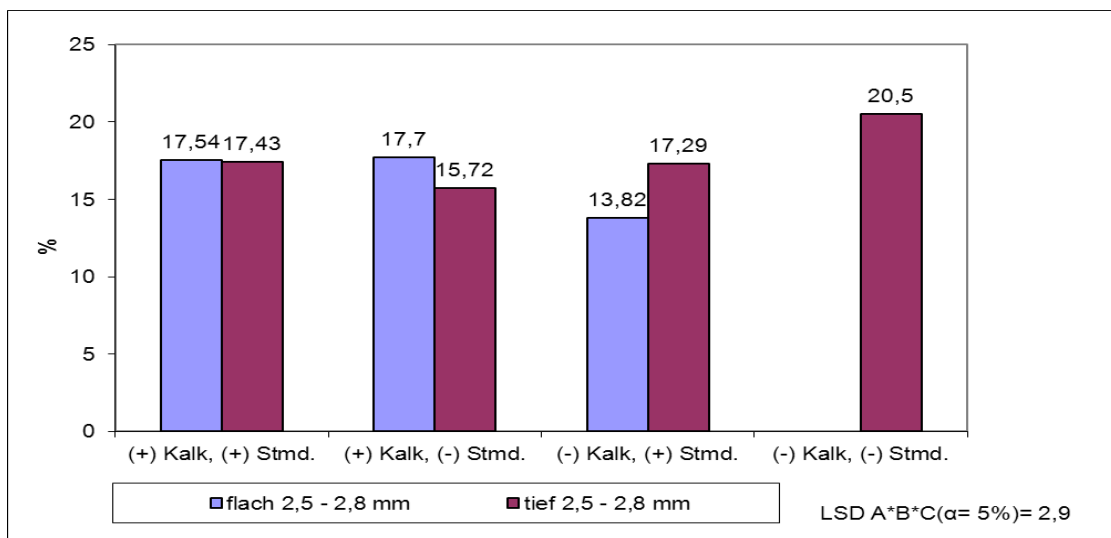


Abb. 45: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung 2,5 – 2,8 mm von Winterweizen (2007)

In der flachen Bodenbearbeitung zeigte sich eine signifikante Abnahme des Anteils der Korngröße von 2,5 - 2,8 mm, während in der tiefen Bodenbearbeitung zwischen den Düngungsvarianten keine eindeutigen Zusammenhänge zu erkennen waren.



Ein noch größerer Anteil an Körnern trat in der Siebfractionierung 2,8 bis 3,0 mm auf (Abb. 46).

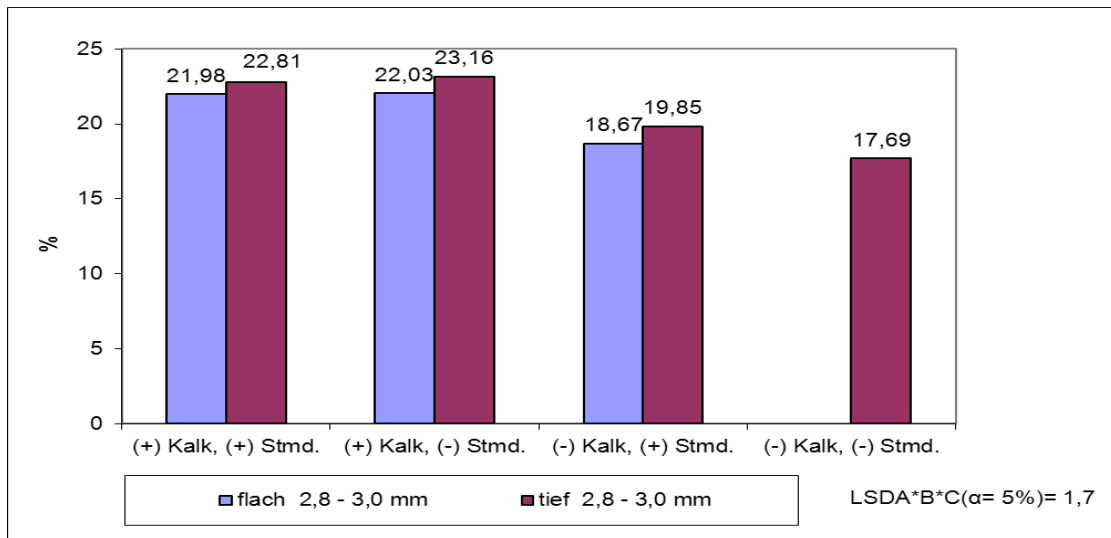


Abb. 46: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung 2,8 - 3,0 mm von Winterweizen (2007)

In dieser Fraktionierung konnten in allen Tiefen und allen Bodenbearbeitungsvarianten (bis auf die Variante ohne Düngung) - wenn auch nicht statistisch gesichert - höhere Anteile beobachtet werden. Kalkdüngung führte im Vergleich zur unterlassenen Kalkdüngung zu signifikant höheren Werten.

In der größten Kornfraktion wurden auch in der unterlassenen Düngung die höchsten Anteile gemessen. Mit Ausnahme der unterlassenen Düngung konnten in allen Varianten mindestens 40 % der Körner in einer Größe von über 3,0 mm nachgewiesen werden, was auf eine gute Kornausbildung hindeutet (Abb. 47).

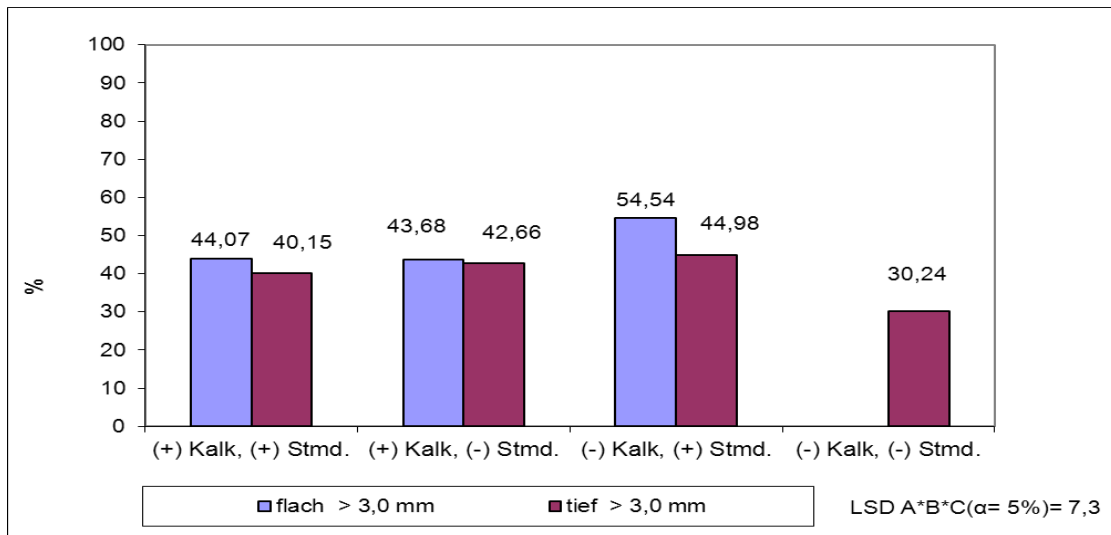


Abb. 47: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Siebsortierung > 3,0 mm von Winterweizen (2007)

„Keine Kalkdüngung“ führte insbesondere in der flachen Bodenbearbeitung zu einem höheren Anteil an Körnern > 3,0 mm. Bei unterlassener Düngung fiel der Anteil an Körnern > 3,0 mm sehr stark ab. In der flachen Bodenbearbeitung wurden höhere Werte als in der tiefen Bodenbearbeitung gemessen. Hier konnten aber nur in der Variante „ohne Kalk“ gesicherte Unterschiede festgestellt werden. Eine langjährig unterlassene Kalkdüngung ergänzt durch die Stallmistdüngung führte zu deutlich größeren Körnern, wo mehr als die Hälfte der gemessenen Weizenkörner eine Korngröße von > 3,0 mm hervorbrachten.

Als ein weiterer Qualitätsparameter wurde der Rohproteingehalt (%) im Weizen gemessen.

Die Rohproteingehalte variierten zwischen den geprüften Varianten zwischen 10,0 und 13,7 %, wobei in der flachen Bodenbearbeitung in der Variante „unterlassene Düngung“ nicht genügend Probenmaterial für die Bestimmung dieses Parameters geerntet werden konnte (Tab. 53).

Tab. 53: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Rohproteingehalt (%) von Winterweizen (2007)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	10,8 ab	10,5 a
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	10,5 a	10,0 a
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	12,3 c	11,9 bc
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	- <sup>1)</sup>	13,7 d
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha=5\%$ )= 1,2		

<sup>1)</sup> Analyse konnte wegen fehlenden Materials nicht durchgeführt werden

Der Einfluss von Kalk- und Stallmistdüngung sowie der unterschiedlichen Bodenbearbeitungstiefen zeigte abgesehen von der „unterlassenen Kalk- und Stallmistdüngung“ keine signifikanten Unterschiede. In beiden Bearbeitungstiefen konnte eine Zunahme des Proteingehaltes von der Variante „mit Kalk- und Stallmistdüngung“ zur Variante „unterlassene Kalk- und Stallmistdüngung“ beobachtet werden. Allerdings ist diese Zunahme des Proteingehaltes nicht auf die Düngung, sondern auf den Verdünnungseffekt zwischen Korn- und Proteingehalt zurückzuführen. Da in der Variante „unterlassene Kalk- und Stallmistdüngung“ nur sehr geringe Erträge erzielt wurden, spiegelten sich diese in hohen Proteingehalten wieder. Allgemein kann gesagt werden, dass die Rohproteingehalte in einem geringen bis mittleren Bereich variierten.

Weiterhin wurde als Qualitätsparameter der Stärkegehalt im Weizen gemessen.

Die Stärkegehalte lagen zwischen 60,5 und 63,7 %. Hier zeigte sich ein umgekehrtes Bild im Vergleich zum Rohproteingehalt (Tab. 54).

Tab. 54: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Stärkegehalt (%) von Winterweizen (2007)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	62,9 cd	63,4 cd
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	63,1 cd	63,7 d
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	61,6 b	62,4 bc
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	- <sup>1)</sup>	60,5 a
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = 5%)= 1,0		

<sup>1)</sup> Analyse konnte wegen fehlenden Materials nicht durchgeführt werden

Die höchsten Werte wurden diesmal in den Varianten „mit Kalk- und mit bzw. ohne Stallmistdüngung“ gemessen. Auch hier zeigten sich zwischen den Düngungen und Bearbeitungstiefen keine besonderen Effekte. Die Ergebnisse zu den Stärkegehalten wurden primär von der negativen Korrelation zum Proteingehalt beeinflusst. Wie beim Proteingehalt sind die Stärkegehalte ebenfalls als mittlere Werte einzustufen.

Die Fallzahl ist ein Qualitätsparameter, welcher weniger von der Düngung oder der Sorte beeinflusst wird, sondern von den Witterungsbedingungen abhängig ist. Von vornherein ist zu erwähnen, dass die gemessenen Werte auf geringe Fallzahlen hindeuten. Optimale Werte zu Fallzahlen bei Winterweizen sollten mindestens 220 Sekunden betragen und den Wert 280 nicht überschreiten (DIEPENBROCK, 2009). Bei den hier gemessenen Werten konnten leider diese Werte nicht erreicht werden und lagen somit unterhalb der optimalen Werte mit 162 bis 209 Sekunden (Tab. 55).

Tab. 55: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf die Fallzahl (s) von Winterweizen (2007)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+)Stallmistdüngung	195 b	194 b
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	209 b	215 b
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	193 b	162 a
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	- <sup>1)</sup>	189 ab
LSD <sub>A*B*C</sub> ( $\alpha$ = 5%)= 27,1		

<sup>1)</sup> Analyse konnte wegen fehlenden Materials nicht durchgeführt werden

Zwischen der Düngung sowie den beiden Bodenbearbeitungstiefen konnten keine eindeutigen Zusammenhänge festgestellt werden.

#### 4.6.7 Ertrag von Körnermais

Im Jahr 2007 stand im Dauerfeldversuch Dedelow Mais als Prüfpflanze. Die erzielten Erträge sind in der Tab. 56 dargestellt.

Tab. 56: Der Ertrag von Körnermais (dt ha<sup>-1</sup>) in den untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten in Dedelow (2007)

Bodenbearbeitungs- variante	Ertrag von Körnermais (dt ha <sup>-1</sup> )
Direktsaat	117,4 ab
Grubber (10 cm)	119,4 a
Grubber (15 cm)	123,4 a
Pflug (15 cm)	124,1 a
Pflug (25 cm)	106,2 b
LSD <sub>A*B</sub> ( $\alpha$ = 5%)= 11,1	

Der Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf den Ertrag von Körnermais lässt sich abgesehen von der Pflug-Variante (25 cm) statistisch nicht unterscheiden. Der höchste Ertrag von Körnermais betrug in der Pflug-Variante (15 cm) 124,1 dt ha<sup>-1</sup>, der niedrigste Ertrag in der Pflug-Variante (25 cm) 106,2 dt ha<sup>-1</sup>.

## 4.7 Diskussion zu pflanzenbaulichen Ergebnissen

Um den Einfluss langjähriger unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf die pflanzenbaulichen Parameter verschiedener Standorte zu untersuchen, stehen für Berlin-Dahlem Ertrag, Ertragsstruktur und Qualität und für Dedelow der Korntrug im Vordergrund dieser Arbeit.

Für die Keimung der Pflanze ist es eine wichtige Voraussetzung eine ausreichende Wasser- und Luftversorgung mit einer bestimmten Mindesttemperatur im Boden zu haben. Unter verschiedenen Düngungs- und Bodenbearbeitungstiefen zeigte die Keimdichte den höchsten Wert in der flachen Bodenbearbeitung unter dem Prüfglied „mit Kalk- und mit Stallmisdüngung“ bei Winterweizen (2007) in Berlin–Dahlem. Als Folge der Erhöhung der Bestandesdichte und des Korntrags lässt sich im Endeffekt auch wie erwartet ein höherer Strohertag finden.

Zahlreiche Studien belegen die Vor- und Nachteile konservierender Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfruchtbarkeit im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung (SCHMIDT, 2004; FAZEKAS, 2005). Es ist von großer Bedeutung, dass die Bodenbearbeitung unter Berücksichtigung der Witterung und des Bodenzustandes standortangepasst erfolgt, da sie den bodenphysikalischen, -chemischen und pflanzenbaulichen Zustand der Ackerflächen beeinflusst. Die Bodenbearbeitung beeinflusst in entscheidendem Maße mit, ob agrotechnische Aktivitäten das Agrarökosystem, den Boden und die Umwelt belasten oder vorrangig der Erhöhung und Stabilisierung der Erträge dienen (HAMPICKE ET AL., 2005). Die Struktur und die wasserschonende Bodenbearbeitung sind besonders für die ertragsschwachen Standorte eine Schlüsselfrage (HAMPICKE ET AL., 2005). Nach langjährigen Untersuchungen verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf leichten Böden in Niedersachsen meint JUISTER (2011), dass im Durchschnitt der Jahre sich für die Mulchsaat und Pflugsaat keine entscheidenden Ertragsdifferenzen ergeben haben. DUTZI (2011) vertritt die Meinung, dass auch schwere, feuchte und heterogene Standorte (sandige und tonige Böden) mit konservierenden Verfahren beherrscht werden können. Nach einer anderen Studie am Standort Petersdorf (Fehmarn) in Schleswig-Holstein mit der Versuchsfrage, ob Mulchsaat auch bei hohen Strohmenngen in Getreidefruchtfolgen nachhaltig ist, wurde nach langjähriger konservierender Bodenbearbeitung diese Frage versucht zu beantworten. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass man bei Mulchsaat langfristig ein hohes Ertragsniveau erhalten kann.

Der Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Kornertrag bei Hafer (2006) in Berlin-Dahlem lag mit dem Höchstwert von 29,2 dt ha<sup>-1</sup> (86 % TS) in der tiefen Bodenbearbeitung unter dem Prüfglied „mit Kalk- und ohne Stallmistdüngung“ vor. Bis auf die Variante „ohne Kalk- und ohne Stallmistdüngung“ der flachen Bodenbearbeitungsvariante war der Effekt von Bodenbearbeitungstiefe und Düngung auf den Kornertrag nicht signifikant. Trotzdem konnte festgestellt werden, dass die Kalkdüngung den Ertrag tendenziell erhöht hat. Nach Angaben von KRZYSCH ET AL. (1992) reagieren Hafer und Winterroggen am geringsten auf die Stallmistgabe auf der Versuchsfläche DIII in Berlin-Dahlem. Die langjährigen Kornerträge des Hafers (1969-2002) zeigen im Vergleich zum Jahr 2006 annähernd gleiche Ergebnisse außer der flachen Variante bei unterlassener Düngung. Unter Betrachtung der einzelnen Jahre des langjährigen Kornertrages ist zu sehen, dass der Minderertrag bei 12,5 dt ha<sup>-1</sup> für das Jahr 1969 und der Höchstertrag bei 32,6 dt ha<sup>-1</sup> für das Jahr 1974 in Berlin-Dahlem betrug (siehe Anhang Tab. A18). Die übrig gebliebenen Jahre zeigen im Vergleich zum Jahr 2006 stets höhere Werte auf. KRZYSCH ET AL. (1992) machen darauf aufmerksam, dass die langjährige Wirkung der Pflugtiefe (17 cm und 28 cm) auf die Erträge von den angebauten Fruchtartengruppen (Hackfruchterträge höher auf flacher Bodenbearbeitung, Getreideerträge höher auf tiefer Bodenbearbeitung) abhängig ist.

Die Kornerträge für Winterweizen (2007) in Berlin-Dahlem zeigten in der flachen Bodenbearbeitung unter dem Prüfglied „mit Kalk- und mit Stallmistdüngung“ den höchsten Ertragswert von 58,4 dt ha<sup>-1</sup>. Im Vergleich zu den anderen Prüfgliedern waren bis auf dem Prüfglied „ohne Kalk- und Stallmistdüngung“ die Ergebnisse statistisch nicht signifikant. Die Mindesterträge zeigten sich in beiden Bodenbearbeitungstiefen in den unterlassenen Düngungspartellen, wobei hier auch zu erwähnen ist, dass in der flachen Bodenbearbeitung nahezu kein Ertrag erfasst werden konnte. Diese Situation ähnelt den Ertragswerten bei Hafer für das Jahr 2006. Außerdem erfolgte eine zunehmende Verschlechterung der Ertragssituation auf den Parzellen bei unterlassener Kalkdüngung. Nach Angaben von KRZYSCH ET AL. (1992) lagen bei fehlender Kalkdüngung 1987/1989 die Ertragsverluste für Winterweizen und Kartoffeln bei ca. 50 %. Auch mit Kombinationswirkung mit Stallmistdüngung bei guter Kalkversorgung gab es nur geringe (15 %) Mehrerträge durch die Stallmistgabe. Bei fehlender Kalkdüngung konnte der Stallmist bei bestimmten Früchten wie bei Winterroggen und Hafer die Erträge bis fast über 100 % ausgleichen. Außerdem weisen KRZYSCH ET AL. (1992) darauf hin, dass fehlende Kalkung und fehlende Stallmistgabe im Mittel bis zu 70 % Ertragsverlusten

führt. Insbesondere wird darauf hingewiesen, dass im langjährigen Verlauf zunehmend größere Verluste von mehr als 30 % bei fehlender Stallmistgabe bei Winterweizen beobachtet wurden.

KÖHN (1973) sowie KÖHN UND CAESER (1988) wiesen darauf hin, gemäß den Ergebnissen der früheren Winterweizenjahre, dass diese Fruchtart mit signifikanten Kornmehrträgen auf Kalk-, Phosphat- und Stallmistdüngung und auf tiefe Pflugfurchen reagierte. Dieses ist nur in der tiefen Bodenbearbeitung unter den Prüfgliedern „ohne Kalk- und mit Stallmistdüngung“ und „ohne Kalk- und ohne Stallmistdüngung“ bei den langjährigen Mittelwerten (1968-2005) zu beobachten.

Die Ertragswerte bei Winterweizen aus dem Jahr 2007 zeigten im Vergleich zu den langjährigen Mittelwerten (1968-2005), mit Ausnahme der unterlassenen Düngungsvariante bei flacher Bodenbearbeitung, stets höhere Werte auf. Es ist dabei natürlich auch wichtig zu wissen, dass sowohl bei Hafer als auch bei Winterweizen die sonst üblichen Herbizidbehandlungen der jeweiligen Jahre für den Vergleich der Ertragswerte in Betracht genommen werden. Eine starke Beeinträchtigung dieser Behandlung für den Winterweizenenertrag lässt sich nach KRZYSCH ET AL. (1992) im Jahr 1989 beobachten, weil im vorherigen Anbaujahr (1987) die Herbizidbehandlung im Herbst unterblieb. Die durch Bewirtschaftung verursachten Ertragsdifferenzen werden bei zunehmender Trockenheit größer, Mangelparzellen reagieren mit bis zu 100 % Ertragsunterschied, wobei ca. 50 % der Ertragsvarianz nach KRZYSCH ET AL. (1992) auf drei klimatisch unterschiedliche Jahre auf der langjährigen Versuchsanlage in Berlin-Dahlem zurückzuführen sind. Dies ist nicht der Fall im Vergleich zu den langjährigen Kornerträgen bei Hafer (2006) und Winterweizen (2007). Ein deutlicher Unterschied bei den Kornerträgen zeigte sich lediglich auf den unterlassenen Düngungspartzellen bei flacher Bodenbearbeitung im Vergleich zu den Partzellen, die gedüngt wurden (2006 und 2007). Der Grund lässt sich anhand der Substratwechsel in den unterlassenen Düngungspartzellen mit den jeweiligen Decksandmächtigkeiten schwer erklären, da die langjährigen Ergebnisse der Kornerträge, z.B. von Hafer, im Vergleich zum Kornertrag 2006 annähernd auf dem gleichen Niveau liegen. Es ist natürlich auch von großer Bedeutung, zu welchem Zeitpunkt die Defizite auftreten. KRZYSCH ET AL. (1992) weisen darauf hin, dass die Zunahme der Wasserspannung im Wurzelraum innerhalb der Wachstumsphase deutlich zu Ertragsdepressionen führen kann. Nach Angaben von KÖHN UND ELLMER (2009) ist die Ertragsleistung der einzelnen Kulturarten in Berlin-Dahlem in Abhängigkeit von der Kalkversorgung sehr unterschiedlich und unterstreicht die spezi-



fischen Ansprüche der Kulturpflanzenarten an die Bodenreaktion. Im Extrem, insbesondere bei gleichzeitig fehlender organischer Düngung, betrug der durch Kalkmangel bedingte Ertragsausfall bei säureempfindlichen Kulturen wie Weizen und Beta-Rüben annähernd 100 %. KÖHN UND ELLMER (2009) weisen darauf hin, dass das Unterlassen der organischen Düngung auf Sandböden bei allen Kulturen relativ schnell zu konstanten Ertragseinbußen zwischen 10 % und 20 % führt. Die Ertragsdifferenzen zwischen „organisch gedüngt“ und „organisch ungedüngt“ sollen sogar bei 40 % liegen.

Der Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf den Ertrag von Körnermais zeigte abgesehen von der Pflug-Variante (25 cm) keine hohen Unterschiede in Dedelow. Der höchste Korntrag von 124,1 dt ha<sup>-1</sup> wurde in der Pflug-Variante (15 cm) erzielt, gefolgt von der Grubber-Variante (15 cm) mit 123,4 dt ha<sup>-1</sup>. Die Maissorte in der Pflug-Variante (25 cm) war eine andere Sorte (ES Progress) als die in den anderen Varianten (Delitop). Bezugnehmend auf schriftliche Angaben von Herrn Dr. Verch war dieser Streifen am stärksten vom Wasserdurchfluss betroffen. Es ist anzunehmen, dass ungünstige Wasser- und Luftverhältnisse in dieser Variante einen negativen Einfluss auf den Korntrag hervorgebracht haben, welcher sich als Mindestertrag zeigte. Die tendenziell niedrigen Kornträge der Direktsaat-Variante sind in den ersten 20 cm Bodentiefe auf den höheren Durchdringungswiderstand zurückzuführen.

Von den Ertragskomponenten reagierte die Bestandesdichte (Rispen je m<sup>2</sup>) bei Hafer unter dem Prüfglied „mit Kalk- und Stallmistdüngung“ bei flacher Bodenbearbeitung mit 383 Rispen je m<sup>2</sup> am höchsten. Interessanterweise war in der flachen Bodenbearbeitung unter der unterlassenen Düngungsvariante die Bestandesdichte von 340 Rispen je m<sup>2</sup> auf ein nahezu gleiches Niveau im Vergleich zu den anderen Varianten gefallen, obwohl dieses in den Ergebnissen der Kornträge nicht wiederzufinden ist. Auf den Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen reagierte die Bestandesdichte bei Winterweizen unter dem Prüfglied „mit Kalk- und mit Stallmistdüngung“ mit 503 Ähren pro m<sup>2</sup> am stärksten. Bei der unterlassenen Düngung in der gleichen Bodenbearbeitung wies sie einen signifikant niedrigeren Wert auf, welcher sich in den entsprechenden Kornträgen gut erklären lässt. KRYZSCH ET AL. (1992) weisen darauf hin, dass die Bestandesdichte (Anzahl „produktiver“ Halme pro Fläche = Anzahl pro Fläche) nicht vollständig über die Saatstärke kontrolliert werden kann. Insbesondere soll die Getreidepflanze einen relativ empfindlichen Adaptationsmechanismus haben. GEISLER (1983) weist darauf hin, dass grundsätzlich bei relativ ungünstigen Anbaubedingungen eine engere Beziehung zwischen der Bestandesdichte und dem Höchstertrag zu er-

warten ist. Nach einer Arbeit von KRZYSCH ET AL. (1992) lässt sich in Berlin-Dahlem feststellen, dass die Korrelation der Bestandesdichte mit dem Kornertrag bei Winterweizen sehr eng und bei Hafer die Korrelation nicht signifikant war. Dieses bestätigen auch die Ergebnisse von Hafer (2006) und Winterweizen (2007). Der Hafer reagiert beim Parameter Bestandesdichte nicht auf Stallmistgabe und hat sogar bei unterlassener Kalkdüngung eine höhere Rispenzahl pro m<sup>2</sup>. Die anzustrebende Bestandesdichte ist generell von den Standortverhältnissen, der Witterung und vom Sortentyp abhängig (Dsv, 2011). Auf Sandböden oder Standorten mit geringen Niederschlägen, wie zum Beispiel im Mitteldeutschen Trockengebiet, sollte beim Weizen eine geringere Bestandesdichte von 400 bis 550 Ähren tragende Halmen pro m<sup>2</sup> angestrebt werden (Dsv, 2011).

Der Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Strohertrag bei Winterweizen waren erwartungsgemäß im Einklang mit den Kornertrags- und Bestandesdichtewerten. Höhere Strohertragswerte wurden in den Parzellen gemessen, in welchen hohe Kornerträge und Bestandesdichten erzielt wurden.

Die Anzahl der Körner pro Ähre bei Winterweizen, welche eine enge Beziehung zum Kornertrag darstellt, war in der tiefen Bodenbearbeitungsvariante tendenziell höher. Dennoch ist eine inverse Beziehung zwischen der Bestandesdichte und der gemessenen Kornzahl pro Ähre zu sehen. Bei den Parzellen, in welchen eine höhere Bestandesdichte gemessen wurde, war die Anzahl der Körner pro Ähre niedriger.

Die äußere Kornqualität wird im Wesentlichen durch kornphysikalische Eigenschaften, wie das Hektolitergewicht, die Siebsortierung und das Tausendkorngewicht bestimmt (EREKUL, 2000).

Das Tausendkorngewicht, eines der wichtigsten Ertragskomponenten, gibt einen Hinweis auf die Körnung der Pflanzen. Die Tausendkorngewichte bei Hafer (2006) zeigten im Vergleich zum Kornertrag ein ähnliches Bild. Von besonderem Interesse ist, dass bei der flachen Variante bei unterlassener „Kalk- und Stallmistdüngung“ nicht die entsprechenden Ergebnisse zum Kornertrag zu sehen waren. GEISLER (1988) meint, dass das Tausendkorngewicht bei Getreide durch produktionstechnische Maßnahmen meist wenig beeinflusst wird, während die Komponenten Bestandesdichte und Kornzahl je Ähre deutlicher reagieren. Nach verschiedenen Literaturangaben liegt das Tausendkorngewicht bei Hafer zwischen 27 – 48 g und bei Weizen zwischen 40 – 65 g, was im

Vergleich zum Tausendkorngewicht bei Hafer (2006) und Winterweizen (2007) in Berlin-Dahlem ein niedriges Niveau darstellt. Dies bringt die ungünstigen Bedingungen des Standortes für die Getreideart Winterweizen zum Ausdruck (KRZYSCH ET AL., 1992).

Das Hektolitergewicht ist eine volumetrische Messgröße, die signifikant von der Schichtung der Körner im Messzylinder beeinflusst wird, was nicht nur sortentypisch, sondern sehr stark auch von äußeren Faktoren wie Bodenart, Witterung, Düngung und Aussaatstärke abhängig ist (ZECHNER, 2001). Das Hektolitergewicht bei Hafer (2006) in Berlin-Dahlem zeigte unter Einfluss verschiedener Düngung und Bodenbearbeitungstiefen mit 44,5 kg und 48,3 kg keine statistisch gesicherten Unterschiede auf. Im Vergleich zum Tausendkorngewicht zeigte das Hektolitergewicht bei Hafer ein ähnliches Bild. Bei Winterweizen war der Effekt von Bodenbearbeitungstiefen wie bei Hafer statistisch nicht signifikant. Jedoch konnten bei unterlassener Kalkdüngung im Vergleich zu den Parzellen, die mit Kalk gedüngt wurden, signifikant niedrigere Hektolitergewichte erzielt werden. Obwohl in den „mit Kalk“ gedüngten Parzellen die Stallmistabgabe zu keinen signifikanten Unterschieden führte, waren bei den ungekalkten Parzellen bei unterlassener Stallmistgabe niedrigere Hektolitergewichte zu verzeichnen.

Die Siebsortierung bei Hafer (2006) zeigte zwischen 2,2 – 2,5 mm den höchsten Anteil bei flacher und tiefer Bodenbearbeitung im Vergleich zu den anderen Korngrößenverteilungen. Als zweiten größten Anteil an Körnern folgte die Siebfraktionierung 2,0 - 2,2 mm. Der geringste Anteil lag in der > 3,00 mm Siebfraktionierung. Der Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefe auf den höchsten Anteil in der Siebsortierung 2,2 – 2,5 mm war statistisch nicht gesichert und wies somit keinen Einfluss von Bodenbearbeitung und Düngung auf diese Fraktionierung auf. Bei den Untersuchungen von Winterweizen (2007) zeichnete sich als größter Anteil die Korngrößenverteilung > 3,00 mm ab. Anders als beim Hafer führte unterlassene Kalkdüngung insbesondere in der flachen Bodenbearbeitung zu einem höheren Anteil an Körnern. Die langjährige unterlassene Kalkdüngung, welche durch die Stallmistgabe ergänzt wurde, führte insgesamt zu einem Höchstanteil an dieser Korngröße.

Der Proteingehalt wird überwiegend durch Umweltfaktoren und agrotechnische Maßnahmen, welche die Stickstoffversorgung der Pflanze bestimmen, beeinflusst (KRÜCK, 1999). Höhere Proteingehalte sind bei zusätzlicher mineralischer Stickstoffdüngung zu erwarten. Nach vielen Literaturstudien wie auch von BECKER ET AL. (2003) wird darauf

hingewiesen, dass die Wirkung der mineralischen N-Düngung auf den Rohproteingehalt mit einer geringeren Ertragswirkung der Stickstoffdüngung verbunden ist. Ob die Stickstoffdüngung eher den Ertrag oder den Rohproteingehalt fördert, hängt von den Witterungsbedingungen in der Kornfüllungs- und Reifephase sowie vom Applikationszeitpunkt des Stickstoffdüngers ab (GEISLER, 1988). Unter dem Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Rohproteingehalt bei Hafer (2006) wurden innerhalb beider Bodenbearbeitungstiefen keine statistischen Ergebnisse festgestellt. Ein bemerkenswerter Unterschied war in der flachen Bodenbearbeitung unter dem Prüfglied „ohne Kalk- und ohne Stallmistdüngung“ mit einem tendenziell höheren Rohproteingehalt im Vergleich zu den anderen Prüfgliedern zu beobachten. Die beschriebene negative Korrelation zwischen dem Rohproteingehalt und dem Kornertrag war hier deutlich zu sehen. Ein ähnliches Bild spiegelte sich bei Winterweizen (2007) in der tiefen Bodenbearbeitung unter dem Prüfglied „unterlassene Kalk- und Stallmistdüngung“ wider. In den Minderertrags-Parzellen zeigte der Verdünnungseffekt zwischen Kornertag und Proteingehalt höhere Proteingehalte mit statistisch gesicherten Werten.

Hafer besitzt gegenüber allen anderen Getreiden den höchsten Ölgehalt und eine äußerst günstige Fettsäurezusammensetzung (ARIP, 2004). In der Literatur sind Angaben über den Ölgehalt im bespelzten Korn zwischen 4 - 6 % zu finden. Der Ölgehalt bei Hafer wird durch den Genotyp und durch die Umwelt beeinflusst. Bei niedrigen Wachstumstemperaturen kann der Ölgehalt höher liegen und auch die Fettsäurezusammensetzung kann beeinflusst werden (ARIP, 2004). In Berlin-Dahlem variierte der Ölgehalt bei Hafer zwischen 3,74 % und 4,33 %. Der Einfluss von beiden Bodenbearbeitungstiefen auf den Ölgehalt war hier nicht zu sehen. Von besonderem Interesse ist in beiden Bearbeitungstiefen, dass sich der Ölgehalt des Hafers sowohl in den Düngungspartellen als auch bei unterlassener Düngung erhöht hat. Nach Angaben von STIEBERITZ ET AL. (2007) sowie VOLLMANN ET AL. (2005) befinden sich diese Ölgehalte in Abhängigkeit der Sorte im Versuch unter den erwarteten Werten und sind auf die Witterungsverhältnisse sowie auf die Standortbedingungen zurückzuführen.

Weizen besitzt den höchsten Stärkegehalt im Vergleich der Ährengetreidearten, gefolgt von Triticale. Es ist bekannt, dass die Stickstoffdüngung entscheidend für die Ertragshöhe und den Proteingehalt ist. Zunehmende Stickstoffgabe fördert zwar den Proteingehalt, reduziert aber den Stärkegehalt. OBERFORSTER (2008) meint, dass bei Winterweizen eine Züchtung auf niedrigere Proteingehalte für überdurchschnittliche Stärke- und Ethanolausbeute am effizientesten wäre. Mit jedem Prozent mehr Stärke sollte die

Ausbeute an Ethanol um 5,5 bis 6,5 l pro Tonne Korntrockenmasse steigen. Nach einer anderen Studie von OBERFORSTER ET AL. (2007) lässt sich auf 28 einfaktoriellen Feldversuchen (2005-2007) Einflüsse von Sorten, Jahren, Standorten und Stickstoffdüngung auf den Stärkegehalt bei Winterweizen erkennen. Der Stärkegehalt zeigte eine Spannweite von 64,4 bis 72,6 % (TS). Die Beziehungen zwischen Protein- und Stärkegehalt wurden regressionsanalytisch quantifiziert und zeigten, dass Protein- und Stärkegehalt fast im Verhältnis 1:1 negativ korrelieren. Nach den Ergebnissen von Winterweizen (2007) in Berlin-Dahlem zeigte sich eine Spannweite zwischen 60,5 - 63,7 %. Das Verhältnis zwischen den Protein- und Stärkegehalten wurde zwar regressionsanalytisch nicht festgestellt, aber es ist von beiden Ergebnissen in Berlin-Dahlem gut erkennbar, dass der Stärkegehalt ein inverses Bild im Vergleich zum Proteingehalt zeigt. Der Einfluss von Bodenbearbeitungstiefen und Düngungen zeigten keinen besonderen Einfluss auf die Stärkegehalte.

Untersuchungen zur Fallzahl geben Hinweise auf die Stärkequalität hinsichtlich der Aktivität der stärkeabbauenden  $\alpha$ -Amylase (EREKUL, 2000). Es ist eine Methode zur Prüfung der Backfähigkeit von Getreidemehl. Je höher die  $\alpha$ -Amylase-Aktivität ist, umso stärker ist die Stärke im Mehl geschädigt und desto niedriger ist die Fallzahl (EREKUL, 2000). Im Allgemeinen hängt die Fallzahl wesentlich von der Interaktion zwischen der Sorte und den Witterungsbedingungen ab (WANG ET AL., 2008). Die Ergebnisse für Berlin-Dahlem zeigten, dass zwischen den Prüfgliedern sowie den beiden Bodenbearbeitungstiefen keine eindeutigen Zusammenhänge festgestellt werden konnten.

## 5. Zusammenfassung

Auf Basis verschiedener Dauerfeldversuche in Berlin-Dahlem und Dedelow war es das Ziel, den Einfluss verschiedener Bodenbearbeitungssysteme auf bodenphysikalische, bodenchemische und pflanzenbauliche Parameter auf sandigen Lehmstandorten zu untersuchen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die Durchdringungswiderstandsmessungen in Berlin-Dahlem wiesen nach langjähriger Bodenbearbeitung in der tieferen Bodenbearbeitungsvariante höhere Bodenfestigkeitswerte bzw. eine höhere Krumenbasisverdichtung im Vergleich zur flachen Bodenbearbeitungsvariante auf. In Dedelow befinden sich die höchsten Durchdringungswiderstandswerte in 10 - 15 cm Bodentiefe unter der Direktsaat-Variante. Der tiefgründige Lockerungseffekt beider Pflugvarianten zeigt bis nahezu 25 cm Bodentiefe die geringsten Bodenfestigkeitswerte im Vergleich zur Direktsaat und konservierenden Bodenbearbeitung.

Die wasserstabilen Aggregate in Berlin-Dahlem wiesen in der flachen Bodenbearbeitung, trotz der höheren Bodenfestigkeitswerte im Vergleich zu der tieferen Variante, höhere Werte in 10 - 15 cm und 20 - 25 cm Bodentiefe auf. Einhergehend mit einem höheren Gesamtkohlenstoffgehalt lassen sich bei der flachen Bodenbearbeitung in dieser Bodentiefe bessere Bodenstruktureigenschaften finden. Am Standort Dedelow wiesen die Aggregatstabilitätswerte in den konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren tendenziell höhere Werte im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung auf.

Die ermittelten Wasserspeicherkurven in Berlin-Dahlem zeigten für die ausgewählten Parzellen in der flachen Bodenbearbeitungsvariante in 10 - 15 cm Bodentiefe tendenziell höhere nutzbare Feldkapazitätswerte im Vergleich zu der tieferen Variante. Die höheren  $C_{org}$ -Gehalte der flachen Bodenbearbeitung beeinflussen die nutzbare Feldkapazität positiv. In den untersuchten unteren Bodentiefen wurden zwischen beiden Bodenbearbeitungsvarianten kaum Unterschiede zwischen den nutzbaren Feldkapazitätswerten erfasst. In Dedelow wiesen die Wasserretentionskurven unter den verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren unregelmäßige Streuungen auf. Die höheren

nutzbaren Feldkapazitätswerte wurden mit tendenziell gering höheren Volumenprozentwerten in der konventionellen Bodenbearbeitung in 10 - 15 cm Bodentiefe erfasst.

Langjährig landwirtschaftliche Bodennutzung führte in Berlin-Dahlem zu einer Veränderung des pH-Wertes im Boden. Die Differenzierung ist bei flacher Bodenbearbeitung deutlicher zu sehen als in der tieferen Variante. In Dedelow wurde der niedrigste pH-Wert bei der Direktsaat-Variante in beiden Untersuchungstiefen gemessen.

Die Gesamtkohlenstoffgehalte in Berlin-Dahlem wiesen in 10 - 15 cm Bodentiefe in der flachen Variante höhere Werte im Gegensatz zur tieferen Variante auf. Auch in 20 - 25 cm Bodentiefe waren diese Werte tendenziell gering höher. Die höchsten Werte wurden in der flachen Bodenbearbeitung unter dem Prüfglied „mit Kalk- und mit Stallmist“ gedüngten Parzellen erzielt. In Dedelow tritt der geringste Gesamtkohlenstoffgehalt in der 10 - 15 cm Bodentiefe unter der Direktsaatvariante auf. Generell ist jedoch zu erwähnen, dass zwischen konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung in 10 - 15 cm Bodentiefe ähnliche Gesamtkohlenstoffgehalte vorherrschen. Die Pflug-Variante (15 cm) zeigte in dieser Bodentiefe den höchsten Wert.

Der Anteil des leicht umsetzbaren Kohlenstoffs ( $C_{\text{hwl}}$ -Gehalt) zeigte in Berlin-Dahlem den gleichen Verlauf wie bei der Differenzierung des Gesamtkohlenstoffgehaltes mit Ausnahme der ungedüngten Parzellen in der flachen Bodenbearbeitung in sowohl 10 - 15 cm als auch in 20 - 25 cm Bodentiefe. Der  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalt war im Vergleich zu den gedüngten Parzellen höher. Auf der Versuchsfläche in Dedelow wiesen die  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalte in 10 - 15 cm Bodentiefe höhere Werte auf als in 20 - 25 cm Bodentiefe. Hier zeigte die konservierende Bodenbearbeitung bzw. die Grubber-Variante (10 cm) im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung und Direktsaat den höchsten  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalt.

Der fördernde Effekt von Kalk- und Stallmistdüngung in Kombination mit der Pflugtiefe auf den Gesamtstickstoffgehalt war in beiden Bodenbearbeitungstiefen in Berlin-Dahlem zu betrachten. Höhere Gesamtstickstoffgehalte lassen sich in der flachen Bodenbearbeitungsvariante besser feststellen. In Dedelow spiegeln sich die nahezu gleichmäßig verteilten Kohlenstoffgehalte am Gesamtstickstoffgehalt wider. Hier sind zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren keine deutlichen Unterschiede der Gesamtstickstoffgehalte zu sehen.

Sowohl in Berlin-Dahlem als auch in Dedelow war kein alleiniger Effekt der Bodenbearbeitungstiefe auf den heißwasserlöslichen Stickstoffgehalt feststellbar.

Die C/N-Verhältnisse in Berlin-Dahlem haben im Durchschnitt den Wert 14 und kennzeichnen damit hohe Umsatzbedingungen. Die beste Stickstoffverfügbarkeit in 10 - 15 cm Bodentiefe stellte die flache Variante unter dem Prüfglied „mit Kalk- und Stallmistdünger“ dar. Gering günstigere C/N-Verhältnisse waren in der 20 - 25 cm Bodentiefe zu sehen. In Dedelow traten in der 10 - 15 cm Bodentiefe die günstigsten C/N-Verhältnisse unter der Direktsaat-Variante auf.

Die Bedeutung der organischen Substanz und deren positiver Effekt auf die  $KAK_{pot}$  auf den tonarmen sandigen Böden stellt ein günstigeres Bild in der flachen Bodenbearbeitungsvariante als in der tieferen in Berlin-Dahlem dar. Auf dem Versuchsfeld in Dedelow waren zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren keine nennenswerten Unterschiede festzustellen.

Der Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Korntrag (86 % TS) bei Hafer (2006) zeigte im Vergleich zu den langjährigen Mittelwerten (1969-2002) ein ähnliches Bild, außer bei der ungedüngten flachen Variante mit einem Mindestertrag von 15,3 dt ha<sup>-1</sup> (86 % TS). Der Höchstwert von 29,2 dt ha<sup>-1</sup> (86 % TS) lag in der tiefen Bodenbearbeitung unter dem Prüfglied „mit Kalk- und ohne Stallmistdüngung“. Der Effekt von Bodenbearbeitungstiefe und Düngung auf den Korntrag bei Hafer konnte nicht festgestellt werden, außer dass das Aufbringen von Kalldünger die Erträge in beiden Bodenbearbeitungstiefen tendenziell erhöht hat. Die Kornträge für Winterweizen (2007) in Berlin-Dahlem wiesen für beide Bodenbearbeitungstiefen in den „mit Kalk und mit Stallmist“ gedüngten Parzellen die höchsten Werte im Vergleich zu den anderen auf. Die Mindesterträge innerhalb der Bodenbearbeitungstiefen waren in den ungedüngten Parzellen zu sehen, wobei in der flachen Bodenbearbeitung in den ungedüngten Parzellen nahezu kein Ertrag erfasst werden konnte. Im Vergleich zu den langjährigen Mittelwerten (1968 - 2005) des Korntrags von Winterweizen, abgesehen von der ungedüngten Variante, wurden in beiden Bodenbearbeitungssystemen höhere Kornträge erzielt. Die Bodenbearbeitungstiefe wirkt sich auf den Winterweizen-Korntrag im Gegenteil zu den Hafer-Kornträgen in der flachen Variante tendenziell besser aus.

Unterschiedliche Bodenbearbeitungsverfahren in Dedelow zeigten keinen Einfluss auf den Ertrag von Körnermais. Der höchste Ertrag von Körnermais wurde unter der konventionellen Bodenbearbeitung in der Pflug-Variante (15 cm) mit 124,1 dt ha<sup>-1</sup> erfasst.



Tieferes Pflügen führte zu einem Mindestertragswert in der Pflug-Variante (25 cm) mit 106,2 dt ha<sup>-1</sup>.

## 6. Summary

On the basis of various long-term field trials it was the goal, to investigate the influence of different tillage systems on soil physical, soil chemical and crop parameters on sandy loamy locations in Berlin-Dahlem and Dedelow. The results of these studies can be summarized as follows:

The penetration resistance values in Berlin-Dahlem showed after long-time tillage in the deep soil tillage system higher compactions or higher plough sole values compared to shallow tillage system. The highest penetration resistance values in 10 - 15 cm soil depth showed the "no-tillage" system in Dedelow. The loosening effect of both plough tillage systems shows up almost 25 cm soil depth the lowest soil compaction values compared to the no-tillage and conservation tillage system.

The soil aggregate stability values in Berlin-Dahlem showed in the shallow tillage, despite the higher soil compaction values compared to the deep tillage system, higher values in 10 - 15 cm and 20 - 25 cm soil depth. Along with a higher total carbon content there can be found better soil structure properties at the shallow soil tillage system in these soil depths. The soil aggregate stability values tend to have higher values in the conservation tillage system compared to the conventional tillage system in Dedelow.

The obtained soil water retention curves in Berlin-Dahlem, showed an increase of the available water capacity for the selected plots in the shallow soil tillage system compared to the deep tillage system in the 10 - 15 cm soil depth. The higher organic carbon contents of shallow tillage system affect the available water capacity positive. There were hardly any differences recorded between the available water capacity values in both studied lower soil depths for both shallow and deep tillage systems. The soil water retention curves showed irregular variations under the different tillage systems in Dedelow. The usable field capacity values were recorded with a slightly higher volume percentage in the conventional tillage system in the 10 - 15 cm soil depth.

The long-term agricultural field trial in Berlin-Dahlem led to a change in the pH-values in soils. The differentiations are much more evident in the shallow tillage system than

the deep tillage system. The lowest pH-values were measured in the no-tillage system in both investigated soil depths in Dedelow.

The total carbon contents in Berlin-Dahlem showed higher values in the 10 - 15 cm soil depth in the shallow tillage system in contrast to the deep tillage system. In the 20 - 25 cm soil depth, these values tend to be slightly higher. The highest values were observed in the shallow tillage system in the "with lime and with farmyard manure" treatments. The lowest total carbon content in Dedelow appeared in the 10 - 15 cm soil depth in the no-tillage system. In general, however, the total carbon contents predominate nearly the same amounts in 10 - 15 cm soil depth in both conservation and conventional tillage systems. The plough-variant (15 cm) showed the highest total carbon content in this soil depth.

The proportion of the easily convertible carbon ( $C_{hws}$ -content) showed in Berlin-Dahlem the same course as in the differentiation of the total carbon content except for the unfertilized plots in the shallow tillage system in both 10 - 15 cm and 20 - 25 cm soil depth. The  $C_{hws}$  content were higher compared to the fertilized treatments. In the experimental field of Dedelow, the  $C_{hws}$  values were higher in the 10 - 15 cm soil depth than in the 20 - 25 cm soil depth. The conservation tillage system or the cultivator (10 cm) showed the highest  $C_{hws}$  values compared to conventional tillage and no-tillage systems.

The beneficial effect of lime and farmyard manure fertilization in combination with the plough depth on the total nitrogen content was to be considered in two tillage depths in Berlin-Dahlem. Higher total nitrogen content could be ascertained in the shallow soil tillage system. The nearly uniformly distributed carbon content against the total nitrogen content reflects in Dedelow also. Among these tillage systems there are no significant differences in the total nitrogen contents. Both in Berlin-Dahlem and in Dedelow there were no effect of only the tillage depth on the hot water-soluble nitrogen content determined.

The C/N-ratios in Berlin-Dahlem have an average value of 14 and mark high turnover conditions. The best nitrogen availability in the 10 - 15 cm soil depth were in the shallow tillage system in the "with lime and with farmyard manure" treatments. Favorable low C/N-ratios were seen in the 20 - 25 cm soil depth. The lowest C/N-ratios appeared in the 10 - 15 cm soil depth in the no-tillage system in Dedelow.

The importance of organic matter and its positive effect on the potential cation-exchange capacity ( $CEC_{pot}$ ) on sandy soils represents a favorable image in the shallow tillage system than the deep tillage system in Berlin-Dahlem. There were no any significant differences determined among the tillage systems in Dedelow.

The influence of fertilization and tillage depth on grain yield (86 % DM) in oats (2006) showed a similar picture in comparison to the long-term average values (1969 - 2002), except for the unfertilized shallow tillage system with a minimum yield of  $15,3 \text{ dt ha}^{-1}$  (86 % DM). The maximum value of  $29,2 \text{ dt ha}^{-1}$  (86 % DM) were established in the deep tillage system in the "with lime and without farmyard manure" treatments. The effects of tillage depth and fertilization on grain yield in oats could not be found, except of the lime applied plots in both tillage systems which show an increase in the corn yield. The grain yields for winter wheat (2007) in Berlin-Dahlem showed for both tillage systems in the "lime and farmyard manure" treatments the highest values in compared to the others. The minimum grain yield within the tillage systems were established in the unfertilized plots, while there were hardly grain yield detected in the in the unfertilized treatments in the shallow tillage system. Compared to the long-term averages (1968-2005) in grain yield of winter wheat, higher grain yields were established in both tillage systems except for the unfertilized treatment. The tillage depth, tend to have a better effect on the grain yield of winter wheat in contrast to the grain yield of oat in the shallow tillage system. Different tillage systems showed no effect on the yield of grain maize in Dedelow. The highest grain yield of maize was recorded under the conventional tillage system in the plough-variant (15 cm) with  $124,1 \text{ dt ha}^{-1}$ . Deeper ploughing led to a minimum yield with  $106,2 \text{ dt ha}^{-1}$  in the plough-variant (25 cm).

## Literaturverzeichnis

- ABID, M., LAL, R. (2008): Tillage and drainage impact on soil quality: II. Tensile strength of aggregates, moisture retention and water infiltration. *Soil & Tillage Research* 103 (2009), 364-372.
- AG BODENSYSTEMATIK (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesrepublik Deutschland, Verlag: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Auflage: 5, 438 S.
- AKKERMANN, M. (2004): Beurteilung des Einflusses einer angepassten Ackernutzung auf den Hochwasserabfluss, Fachbereich Geowissenschaften und Geographie, Diss., 158 S.
- ALVAREZ, R., STEINBACH, H.S. (2009): A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in Argentine Pampas. *Soil & Tillage Res.* 104, 1-15.
- APPEL, T., BERG, V., LAUFER, O., BAI, M. (2008): Bewirkt die konservierende Bodenbearbeitung eine Sequestrierung von Kohlenstoff im Boden? *VDLUFA-Schriftenreihe* 64, Kongressband 2008, Göttingen, 519-528.
- ARIP, 2004: Nackthafer mit verbesserten Eigenschaften aus Kreuzungen von Spelz- und Nackthafer. Landwirtschaftliche Fakultät der Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg, elektronisches Dokument, Diss., 109 S.
- ATKINSON, B.S., SPARKES, D. L., MOONEY, S. J. (2009): Effect of seedbed cultivation and soil macrostructure on the establishment of winter wheat (*Triticum aestivum*). *Soil & Tillage Research* 103, 291-301.
- BARTH, C. (2003): Die Wirksamkeit der Kapillarsperre als Deponieoberflächenabdichtung: Feldversuche auf der Deponie Bayreuth. LMU München: Fakultät für Geowissenschaften, Diss., 119 S.
- BECK, T.H. (1991): Forschungsbedarf im Zusammenhang mit den Zielvorstellungen der Mess- und Voraussagbarkeit von Elementen und Prozessen der Bodenfruchtbarkeit: Bodenbiologische Prozesse. *Berichte über Landwirtschaft*, SH 203, 85-99.
- BECKER, K., LEITHOLD G. (2003): Weitreihenbau bei Weizen: Strategie zur Optimierung von Backqualitäten und Fruchtfolge im Ökologischen Landbau. In: Freyer, B. (Hrsg.): *Ökologischer Landbau der Zukunft. Beiträge zur 7. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau*, Universität für Bodenkultur Wien, 77-80.
- BEISECKER, R. (1993): Einfluß langjährig unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge, die Wasserinfiltration und die Stoffverlagerung eines Löß- und eines Sandbodens, Justus-Liebig-Universität Gießen, Diss., 195 S.
- BILALIS, D., VAKALI, C., SIDIRAS, N., KÖPKE, U. (2001): Einfluss von drei Bodenbearbeitungssystemen auf bodenphysikalische Eigenschaften und Wurzelwachstum von Wintergerste auf einem Ackerstandort in Athen,

- Griechenland. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 13, Freising, 252-253.
- BLUME, H.-P., BRÜMMER, G.W., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABNER, I., KRETZSCHMAR, R., STAHR, K., WILKE, B.-M. (2010): Scheffer / Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Aufl., 2010. XIV, Springer Spektrum Verlag, 570 S.
- BODENBERICHT (2003): Demonstrationsversuch auf der Dauerbeobachtungsparzelle „Oberacker“. Bodenbericht 2003, Abteilung Umwelt und Landwirtschaft. <http://www.pfluglos.de/media/documents/1242636549.pdf>, 29.03.2012.
- BRANDSTETTER, G. (2006): Mulchsaat-Direktsaat. <http://direktsaat.twoday.net/>, 29.03.2012
- BRUNOTTE, J. (2007): Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zur Minderung von Bodenschadverdichtungen, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Sonderheft 305, Landbauforschung, 159 S.
- BUNDES-BODENSCHUTZGESETZ (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. Viertes Teil, Landwirtschaftliche Bodennutzung (§17), gute Fachliche Praxis in der Landwirtschaft, BGBl. I, 502 S.
- CARTER, M. R. (1991): Evaluation of shallow tillage for spring cereals on a fine sandy loam. 2. Soil physical, chemical and biological properties. Soil & Tillage Research 21, 37-52.
- CAVALIERI, K.M.V., SILVA, A.P., TORMENA, C.A., LEO, T.P., DEXTER, A.R., HAKANSSON, I. (2009): Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Parana, Brazil, Soil & Tillage Research 103, 158-164.
- CHEN, Y., LIU, S., LI, H., LI, X.F., SONG, C.Y., CRUSE, R.M., ZHANG, X.Y. (2011): Effects of conservation tillage on corn and soybean yield in the humid continental climate region of Northeast China. Soil & Tillage Research 115-116, 56-61.
- CHMIELEWSKI, F.M. (2006): Wetterbeobachtungen. Beobachtete Klimawerte am Versuchsstandort Dahlem im Jahr 2006. Humboldt-Universität zu Berlin, Department für Nutzpflanzen- und Tierwissenschaften, Fachgebiet Agrarmeteorologie.
- CHMIELEWSKI, F.M. (2007): Wetterbeobachtungen. Beobachtete Klimawerte am Versuchsstandort Dahlem im Jahr 2007. Humboldt-Universität zu Berlin, Department für Nutzpflanzen- und Tierwissenschaften, Fachgebiet Agrarmeteorologie.
- CHMIELEWSKI, F.M. (2009): Dauerfeldversuche in Brandenburg und Berlin. Beiträge für eine nachhaltige Landwirtschaftliche Bodennutzung. Schriftenreihe des Landesamtes für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung, Abteilung Landwirtschaft und Gartenbau, Reihe Landwirtschaft, Band 10, Heft IV, 216 S.
- CLAUPEIN, W. (1994): Möglichkeiten und Grenzen der Extensivierung im Ackerbau. Wirkungen der Bewirtschaftungsintensität auf die langfristige Produktivität und Stabilität von Agrarökosystemen und deren Umweltwirkungen. Triade-Verlag Erika Claupein, Göttingen, 224 S.

- CLAUSSEN, A., BEHRENS, W., MELCHIOR, S. (2003): Die Wasserdurchlässigkeit von Trisoplast, Teil 2: Numerische Modellierung, Müll und Abfall. Fachzeitschrift für Abfall- und Ressourcenwirtschaft, 282-288.
- CRAMER, B. (2006): Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und Prognose von Schadverdichtungen auf Ackerböden in Nordrhein-Westfalen. Institut für Nutzpflanzenwissenschaften Ressourcenschutz Fachbereich Bodenwissenschaften, 177.
- DANNOWSKI, M. (1995): Die Auswirkungen konventioneller Landbewirtschaftung auf die nachhaltige Fruchtbarkeit des Bodens in einem Agrarlandschaftselement des Nordost-deutschen Tieflandes. Arch. Acker-Pfl. Boden, Vol.39, 237-259.
- DIEPENBROCK, W., ELLMER, F., LÉON, J. (2009): Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung. 2., korrigierte Auflage, Stuttgart, Eugen Ulmer, 366 S.
- DSV (2011): Deutsche Saatveredelung AG. Welche Bestandesdichten sollen angestrebt werden? <http://www.dsv-saaten.de/getreide/winterweizen/bestandsdichten.html>, 27.03.2012.
- DUTZI, S. (2011): Intelligenter Pflanzenbau. Versuchsergebnisse zu Bodenbearbeitung und Saat. Amazone-Versuche auf dem Standort Hellvoetsluis, Niederlande, Teil I: Das 3C-Ackerbau-Konzept, 118 S.
- EHLERS, W., SCHMIDTKE, K., RAUBER, R. (2003): Änderung der Dichte und Gefügefunktion südniedersächsischer Lössböden unter Ackernutzung. Landnutzung und Landentwicklung, 44 (1), 9-18.
- EITZINGER, J., KLAGHOFER, E. (1995): Einfluss unterschiedlicher Primärbodenbearbeitung auf ausgewählte bodenphysikalische Eigenschaften. Artikel aus der Zeitschrift: WASSER & BODEN, Jg.: 47, Nr. 11, 43-48.
- ELLMER, F. (2003): Bodenbearbeitung und Bodenschutz. In: Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung. Verl. UTB, Stuttgart; Auflage: 2., Aufl. 2009 , 366 S.
- ELLMER, F., EPPERLEIN J. (2006): Pflugverzicht in Streusandbüchse. In: Neue Landwirtschaft 5/2006, 34-37.
- ELLMER, F., PESCHKE H., KÖHN, W., CHMIELEWSKI F.M., BAUMECKER, M. (2000): Tillage and fertilizing effects on sandy soils. Review and selected results of long-term experiments at Humboldt-University Berlin. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, Volume 163, Issue 3, 267-272.
- EMMERLING, C. (2002): Einfluss reduzierter Grundbodenbearbeitung im Ökologischen Landbau auf bodenökologische Eigenschaften. Einfluss reduzierter Grundbodenbearbeitung auf die Bodenökologie, LPP Schriftenreihe, 25-46.
- EPPERLEIN, J. (2001): Vergleichende Untersuchungen zum Einfluss konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung auf ausgewählte biologische und physikalische Bodenparameter im Biosphärenreservat Schorfheide-Chori. Institut für Pflanzenbauwissenschaften der LGF der Humboldt-Universität zu Berlin, Diss., 163 S.
- EREKUL, O. (2000): Einfluss langjähriger differenzierter Düngung auf Ertrag und Qualität von Winterweizen und Sommergerste. Standortvergleich Berlin (D) – Tartu (Est), Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, Humboldt-Universität zu Berlin, Diss., 157 S.

- EXKURSIONSFÜHRER DER DBG (2003): Exkursionsführer zur Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 2003 in Frankfurt / Oder. Frielinghaus, M., Dalchow, C., Schäfer, H. (Hrsg.). Müncheberg.
- FAZEKAS, O. (2005): Bedeutung von Bodenstruktur und Wasserspannung als stabilisierende Kenngrößen gegen intensive mechanische Belastungen in einer Parabraunerde aus Löss unter Pflug- und Mulchsaat. Inst. für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts Universität zu Kiel, Diss., 170 S.
- FIEDLER, H. J. (2010): Böden und Bodenfunktionen in Ökosystemen, Landschaften und Ballungsgebieten. Hrsg.: Europäisches Institut für Postgraduale Bildung an der TU Dresden e.V. -EIPOS-; 2001, Expert-Verlag, 598 S.
- FORSTREUTER, T. (1999): Bodenfruchtbarkeitskennwerte und Kulturpflanzenenergie in zwei Bodennutzungssystemen. Georg-August Universität Göttingen, Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen, Diss., 171 S.
- FRANZLUEBBERS, A. J. (2001): Water Infiltration and Soil Structure Related to Organic Matter and its Stratification with Depth. Soil Tillage Research, Vol. 66, Issue 2, 197-205.
- FRASSL, F. (2008): Untersuchungen zum Einfluss von Lastschaltgetriebe und stufenlosem Getriebe auf den Kraftstoffverbrauch bei Bodenbearbeitung und Transport, Boku Wien, Diplomarbeit 89 S.
- FRIELINGHAUS, M. (2001): Grundsätze des Bodenschutzes auf Jungmoränenstandorten und Empfehlungen für ihre praktische Umsetzung in Mecklenburg-Vorpommern. Mitteilung der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern, Heft 24, 17-22.
- GEISLER, G. (1983): Ertragsphysiologie von Kulturarten des gemäßigten Klimas. Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg, 205 S.
- GEISLER, G. (1988): Pflanzenbau. Ein Lehrbuch - Biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg, 2. Erw. Aufl., 530 S.
- GISI, U., SCHENKER, R., SCHULIN, R., STADELMANN, F.X., STICHER, H. (1997): Bodenökologie - 2. Auflage - Stuttgart; New York: Theme, 350 S.
- GREGORICH, E.G., CARTER, M.R., DORAN, J.W., OANKHURST, C.E., DWYER, L.M. (1997): Biological attributes of soil quality. In: Gregorich, E.G., Carter, M.R. (Eds.), Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Elsevier, New York, 81-114.
- HAMPICKE, U., LITTERSKI, B., WICHTMANN, W. (2005): Ackerlandschaften, Nachhaltigkeit und Naturschutz auf ertragsschwachen Standorten, Verlag: Springer, ISBN 3-540-24194-9, 311 S.
- HANSEN, E.M., DJURHUUS, J. (1997): Nitrate leaching as influenced by soil tillage and catch crop. Soil & Tillage Res. 41, 203-219.
- HARTGE, K., H., HORN R. (1999): Einführung in die Bodenphysik. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Auflage 3, 304 S.
- HELMES, T. (2004): Urbane Böden: Genese, Eigenschaften und räumliche Verteilungsmuster; eine Untersuchung im Stadtgebiet Saarbrücken. Universität des Saarlandes, Diss., 256 S.



- HILL, R.L. (1990): Long – Term Conventional and No – Tillage Effects on Selected Soil Physical Properties. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 54, 161 – 166.
- HOFMANN, B. (2003): Einfluss langjährig unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf Humusgehalt und biologische Bodeneigenschaften. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 15, 288-289.
- JACOBS, A., RAUBER, R., LUDWIG, B. (2009): Impact of reduced tillage on carbon and nitrogen storage of two Haplic Luvisols after 40 years. *Soil & Tillage Research* 102, 158-164.
- JAYNES, D. B., TYLER, E.J. (1980): Comparison of one-step outflow laboratory method to an in situ method for measuring hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 44, Issue 6, 903-907.
- JORDAN, A., ZAVALA, L. M., GIL, J. (2010): Effects of mulching on soil physical and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *Catena* 81, 77-85.
- JOSCHKO, M., BARKUSKY, D., HOHN, W., ROGASIK, H., HIEROLD, W., GROSSMAN, B. (2007): Weniger Humusbedarf bei Mulchsaat? *Landwirtschaft Ohne Pflug* 3/2007, 12–18.
- JUISTER J. (2011): Intelligenter Pflanzenbau. Versuchsergebnisse zu Bodenbearbeitung und Saat. Amazone-Versuche auf dem Standort Huntlosen, Niedersachsen. Teil I: Das 3C-Ackerbau-Konzept, 118 S.
- KAHNT, G. (1995): Minimal Bodenbearbeitung. Verlag Eugen Ulmer, 112 S.
- KAUTZ, T. (2004): Bodenökologische Wirkungen differenzierter organisch-mineralischer Düngung an verschiedenen Standorten. Fachgebiet Acker- und Pflanzenbau der Humboldt-Universität zu Berlin, Diss., 134 S.
- KEMPER, W. D., KOCH, E. J. (1966): Aggregate stability of soils from western USA and Canada. *US Dep. Agric. Tech. Bull.* 1355.
- KOSURIC, S., HUSNJAK, D., BOGUNOVIC, M. (2001): Influence of different tillage systems on soil water availability in the Ap-horizon of an Albic Luvisol and yield in north-west Slavonia, Croatia. *Die Bodenkultur* 52 (3), 215-223.
- KÖHN, W. (1973): Der Einfluss langjähriger ackerbaulicher und pflanzenbaulicher Maßnahmen auf die Eigenschaften und die Ertragsleistungen eines Sandbodens unter besonderer Berücksichtigung getreidereicher Fruchtfolgen. Technische Universität Berlin, Diss., 268 S.
- KÖHN, W. (2000) :Versuchsführer 2000, Humboldt–Universität zu Berlin, 96-99.
- KÖHN, W., CAESAR, K. (1988): Langzeituntersuchungen zur Pflugtiefe, Kalkung, Stallmistdüngung sowie Fruchtfolge in Berlin-Dahlem, *Ber. Ges. Pflanzenbauwiss.* 1, 105-125.
- KÖHN, W., ELLMER, F. (2009): Dauerfeldversuche in Brandenburg und Berlin. Beiträge für eine nachhaltige Landwirtschaftliche Bodennutzung. Schriftenreihe des Landesamtes für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung, Abteilung Landwirtschaft und Gartenbau, Reihe Landwirtschaft, Band 10 (2009) Heft IV, 216 S.
- KÖRSCHENS, M. (1997): Abhängigkeit der organischen Bodensubstanz (OBS) von Standort und Bewirtschaftung sowie ihr Einfluss auf Ertrag und Bodeneigenschaften. *Archives of Agronomy and Soil Science*, Vol. 41, Issue 46, 435-463.

- KÖRSCHENS, M., SCHULZ, E., BEHM, R. (1990): Heißwasserlöslicher C und N im Boden als Kriterium für das N-Nachlieferungsvermögen. Zentralblatt für Mikrobiologie, 145, 305-311.
- KREITMAYR, J. (2005): Bedeutung standortangepasster Bodenbearbeitungs- und Bestellverfahren für den Bodenschutz. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz. <http://www.lfl.bayern.de/iab/bodenbearbeitung/13549/index.php>. 27.03.2012.
- KREUZ, E. (1991): Veränderungen des Humus- und Nährstoffgehaltes einer Lössschwarzerde in unterschiedlichen Dreifelder-Fruchtfolgen durch Knaulgras-Zwischenfrucht und pfluglose Bodenbearbeitung. Universität für Bodenkultur Wien, Forschung, die Bodenkultur - Journal, Band 42, Heft 4, 319-325.
- KRÜCK, S. (1999): Einfluss der Nutzung auf Bodenfruchtbarkeitsparameter, Humusgehalt und Regenwurmaktivität, und deren Beziehung zur Ertragsfähigkeit sandiger Böden in Brandenburg. Berlin, Humboldt-Univ., 1999, Diss., 154 S.
- KRZYSCH, G., CAESAR, K., BECKER, K., BRODOWSKI, M., DRESSLER, U.-B., GRIMM, J., JANCKE, G., KRAUSE, S., SCHLENTHER, L. (1992): Einfluss von langjährig differenzierten Bewirtschaftungsmaßnahmen und Umweltbelastungen auf Bodenfruchtbarkeit und Ertragsleistung eines lehmigen Sandbodens, Technische Universität Berlin, 327 S.
- LARINK, O. (1998): Bodenbearbeitung und Bodenleben. KTBL- Schrift 266, 80-87.
- LAUBENGEIGER, K., REIDT, D., MÜLLER, K. (2006): Bodenverdichtung und Tieflockerung. Theorie, ökologische Relevanz, Bewertungsmethoden und Gegenmaßnahmen. Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Geographisches Institut, Hauptseminar Bodenschutz, Leitung: Prof. Dr. Thomas Scholten, SoSe 2006. 29 S.
- LEE, S.B., LEE, C.B., JUNG, K.Y., PARK, D., KIM, P.J. (2009): Changes of soil organic carbon and its fractions in relation to soil physical properties in a long-term fertilized paddy. Soil & Tillage Research 104, 227-232.
- LEINWEBER, P., SCHULTEN, H. R., KÖRSCHENS M. (1995): Hot water extracted organic matter: chemical composition and temporal variations in a long-term field experiment. Biol. Fertil Soils. 20, 17-23.
- LI, D., LIU, M., CHENG, Y., WANG, D., QIN, J., JIAO, J., LI, H., HU, F. (2011): Methane emission from double-rice cropping system under conventional and no tillage in southeast China. Soil & Tillage Research 113, 77-81.
- LOPEZ FANDO, C., PARDO, M.T. (2011): Soil carbon storage and stratification under different tillage systems in a semi-arid region. Soil & Tillage Research 111, 224-230.
- LUGWIG, R., PETERSEN, M. (2007): Aktuelle Fragen und Entwicklungen des europäischen Bodenschutzrechts. Natur und Recht 29, 439-502.
- MARSCHALL, K., STAHL, H. (2004): Vorsorge zum Bodengefügeschutz. Tagungsband zur Fachveranstaltung der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) und des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (LfUG). Landwirtschaftlicher Bodenschutz in Sachsen, 79 S.
- MATTHEß, G., UBELL, K. (2003): Allgemeine Hydrogeologie - Grundwasserhaushalt. Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 1 : 2. Aufl., XII, 575 S.

- McFARLAND, M.L., HONS, F.M., LEMON, R.G. (1990): Effects of tillage and cropping sequence on soil physical properties. *Soil & Tillage Research*, Vol. 17, Issues 1-2, 77-86.
- MCGARRY, D., BRIDGE, B.J., RADFORD, B.J. (2000): Contrasting Soil Physical Properties After zero and Traditional Tillage of an Alluvial Soil in the Semi – Arid Tropics. *Soil & Till. Res.* 53, 105–115.
- MONTANARELLA, L. (2011): European Commission - Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability, Europe`s Leading Portal for Scientific Dissemination, Research MediaLtd, 2011. <http://www.research-europe.com/index.php/2011/08/dr-luca-montanarella-secretary-of-the-european-soil-bureau-network/>, 27.03.2012.
- MÜLLER, E. (2002): Humus und Nährstoffverteilung bei dauerhaft konservierender Bodenbearbeitung. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft. Fachbereich 4, Pflanzliche Erzeugung, Referat 42 Bodenkultur, 4 S.
- MURER, E.J., BAUMGARTEN A., EDER G., GERZABEK M.H., KANDELER E. & RAMPAZZO N., (1993): An improved sieving machine for estimation of soil aggregate stability (SAS). *Geoderma* 56, 539-547.
- OBERFORSTER, M. (2008): Einfluss der Kornqualität auf die Ethanolausbeute bei Weizen und Triticale. Tagungsbericht der Arbeitsgemeinschaft für Lebensmittel-, Veterinär- und Agrarwesen, Thema: Ernähren uns in der Zukunft Energiepflanzen?, 84-86.
- OBERFORSTER, M., KÖHLDORFER, R. (2007): Genetische und umweltbedingte Variation des Stärkegehaltes von Weizen und Triticale in Hinblick auf die Bioethanolerzeugung, Fortschritte in der Saatguttechnologie und -Untersuchung - Ertragsorientierte Züchtungsstrategien für neue Verwertungsmöglichkeiten. 58. Tagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs 2007, 105-109.
- PETELKAU, H., ROGASIK, H. (1994): Schadverdichtungen der Moränenböden - Eine akute Gefahr? *Zuckerrübe*, 43 (2), 144-147 und 43 (3), 200-203.
- PRONIN, D. (2002): Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitungs- und Bestellverfahren auf die vertikale Differenzierung von Bodenkennwerten auf lehmigem Sand (Brandenburg) und auf Schwarzerde (Novosibirsk) sowie auf ausgewählte Pflanzenmerkmale. Humboldt-Univ. zu Berlin, Diss., 101 S.
- RAWLS, W. J., PACHEPSKY, Y. A. (2002): Soil Consistence and Structure as Predictors of Water Retention. *Journal of Soil Science Society of America*. 66(4), 1115-1126.
- REGINA, K., ALAKUKKU, L. (2010): Greenhouse gas fluxes in varying soils types under conventional and no-tillage practices. *Soil & Tillage Research* 109, 144-152.
- REXROTH, H. (2000): Steigende Erträge ohne Pflug. *Landwirtschaft ohne Pflug*, Heft 9, 9-12.
- RIEGER, S. B. (2001): Impacts of tillage systems and crop rotation on crop development, yield and nitrogen efficiency. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Diss., 138 S.
- ROSNER, J., KLIK, A. (2005): Konservierende Bodenbearbeitungssysteme Boden-, Nährstoff- und Pestizidabträge in trockenen und mäßig feuchten Lagen

- Ostösterreichs, Biomedical and Life Sciences, Gesunde Pflanzen, Volume 57, Nr. 7, 179-186.
- SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Aufl., neubearb. und erw. Aufl. von H.-P. BLUME, G.W. BRÜMMER, R. HORN, E. KANDELER, I. KÖGEL-KNABNER, R. KRETZSCHMAR, K. STAHR, B.-M. WILKE (2010). Springer Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, 570 S.
- SCHEIL, S. (2007): Zweiter Entwurf zur europäischen Bodenschutzstrategie-Chance für ein hohes Schutzniveau zulasten der Subsidiarität. *Natur und Recht* (2007) 29, 176-181.
- SCHINDLER, U. (1980): Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben. *Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd.*, 24, 1-7.
- SCHINDLER, U., BOHNE, K., SAUERBREY, R. (1985): Comparison of different measuring and calculating methods to quantify the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 148, 607-617.
- SCHMIDT, W. (2004): Bodenschutz in der Landwirtschaft – Handlungsempfehlungen in Sachsen. Tagungsband zur Fachveranstaltung für Landwirtschaft (LfL) und des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (LfUG), Leipzig, 3-11.
- SCHMIDT, W., NITZSCHE, O., GEBHARDT, C. (2002): *Fusarium pfluglos bekämpfen*. Infodienst der Sächsischen Agrarverwaltung 05, 48–52.
- SCHULZ, E. (1997): Charakterisierung der organischen Bodensubstanz (OBS) nach dem Grad ihrer Umsetzbarkeit und ihre Bedeutung für Transformationsprozesse für Nähr- und Schadstoffe. *Arch. Acker- Pfl. Boden.* 41, 465-483.
- SCHWEITZER, K. (2010): Naturnahe Böden im Berliner Stadtgebiet. Referenz für Anthropogene Bodenentwicklung oder Beispiel für Anthropogene Bodenveränderungen. *Berliner Geographische Arbeiten* 117 / Boden des Jahres 2010 – Stadtböden, 13-22.
- SCHWEN, A., BODNER, G., SCHOLL, P., BUCHAN, G.D., LOISKANDL, W. (2011): Temporal dynamics of soil hydraulic properties and water-conducting porosity under different tillage. *Soil & Tillage Research* 113, 89-98.
- SHI, X.Z., WANG, H.J., YU, D.S., WEINDORF, D.C., CEHENG, X.F., PAN, X.Z., SUN, W.X., CHEN, J.M. (2009): Potential for soil carbon sequestration of eroded areas in subtropical China. *Soil & Tillage Research* 105, 322-327.
- SINGH, P., FLURY, M., SCHILLINGER, W.F. (2011): Predicting seed-zone content for summer fallow in the Inland Pacific Northwest, USA. *Soil & Tillage Research* 115-116, 94-104.
- SOMMER, C. (1998): Konservierende Bodenbearbeitung: Ein Konzept zur Lösung agrarrelevanter Bodenschutzprobleme. *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft* 191, 128 S.
- SOMMER, C., BRUNOTTE J., ORTMEIER, B., ZHAO, R. (1994): Einführung von Verfahren der Konservierenden Bodenbearbeitung in die Praxis. *FuE-Vorhaben* 87 UM 01. Inst. F. Betriebstechnik, FAL, Braunschweig-Völkenrode, 368 S.
- STIEBERITZ, M., LOOK, B., KÖHLER, A., HOFMANN, B., CHRISTEN, O. (2007): Einfluss von variierter Stickstoffdüngung auf Ertrag und Kornqualität bei verschiedenen Winterrapsgenotypen. *Mitteilung der Gesellschaft für*

- Pflanzenbauwissenschaften, Band 19, 50 Jahre Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften – Rückblick und Perspektive für die Zukunft, 19, 22-23.
- TEBRÜGGE, F. (2001): Gedanken zum Klimaschutz durch konservierende Bodenbearbeitung, Landwirtschaft ohne Pflug, Heft 5, 3.
- TEBRÜGGE, F., DÜRING, R.-A. (1999): Reducing tillage intensity – a review of results from a long – term study in Germany. Soil & Tillage Research, Vol. 53, Issue 1, 15-28.
- UGT GMBH: Umwelt-Geräte-Technik GmbH. <http://ugt-online.de/home.html>, 11.05.2012
- ULRICH, S. (2008): Zum Indikatorwert ausgewählter physikalischer Parameter und Kenngrößen des Kohlenstoffhaushaltes im Boden unter Berücksichtigung von Daten aus langjährigen Bodenbearbeitungs- und Dauerdüngungsversuchen. Martin-Luther-Universität Halle Wittenberg, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Diss., 141 S.
- UMWELTBUNDESAMT (2004): Jahresbericht 2004. Herausgeber: Umwelt Bundesamt (UBA). Gestaltung und Druck: KOMAG mbH, Berlin, 137 S.
- VAN GENUCHTEN, M. TH. (1980): A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, 892-898.
- VERCH, G. (2008): Witterungsverlauf 2007 (Niederschlag und Temperatur im Vergleich zum langjährigen Mittel 1985 - 2000). ZALF Forschungsstation Dedelow, Wetterstation Standort Dedelow.
- VERCH, G., KACHELE, H., HOLTL, K., RICHTER, C., FUCHS C. (2009): Comparing the profitability of tillage methods in Northeast Germany-A field trial from 2002 to 2005. Soil & Tillage Research 104, 16-21.
- VERSUCHSFÜHRER 2004: Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, Institut für Pflanzenbauwissenschaften, Versuchsstation, Humboldt-Universität zu Berlin. Zusammenstellung und Bearbeitung: Dr. Wolfgang Köhn, 201 S.
- VOGEL, H. (2006): Darstellung des Substratwechsels in Berlin-Dahlem (Grafische Darstellung, VOGEL, 2006). Humboldt-Universität zu Berlin, Department für Nutzpflanzen- und Tierwissenschaften, Fachgebiet Acker- und Pflanzenbau.
- VOGEL, H. (2007): :Darstellung der Substratschichtung in der Versuchsanlage V751/5 in Dedelow. Humboldt-Universität zu Berlin, Department für Nutzpflanzen- und Tierwissenschaften, Fachgebiet Acker- und Pflanzenbau.
- VOGELER, I., ROGASIK, J., FUNDER, U., PANTEN, K., SCHNUG, E. (2009): Effect of tillage systems and P-fertilization on soil physical and chemical properties, crop yield and nutrient uptake. Soil & Tillage Research 103, 137-143.
- VOLLMANN, J., KARGL, C., MORITZ, T., BAUMGARTNER, S. (2005): Agronomische Evaluierung von Zuchtmaterial des Leindotters nach Selektion auf Samenmerkmale. Mitteilung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Wasser und Pflanzenbau – Herausforderung für zukünftige Produktionssysteme, Band 17, 168-169.
- WALTHER, H. (1986): Einfluss verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf den Pflanzenbestand und einige Bodeneigenschaften, Universität Gießen, Fachb. Agrarwissenschaften, Gießen, Diss., 188 S.

- WANG, J., PAWELZIK, E., WEINERT, J., ZHAO, Q., WOLF, G.A. (2008): Factors influencing falling number in winter wheat, *European Food Research and Technology*, Vol. 226, Numb. 6, 1365-1371.
- WENDROTH, O. (1990): Koeffizienten des Wassers- und Gastransportes zur Ableitung von Kenngrößen des Bodengefüges. Fachbereich Agrarwissenschaften der Uni. Göttingen, Diss., 173 S.
- WETZEL, M. (2005): Modellierung der Hangwasserdynamik eines Untersuchungsgebietes im Nationalpark Heinich mit dem Modell Hydrus-2D. Friedrich-Schiller-Universität Jena. Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät. Institut für Geographie Diplomarbeit, 130 S.
- WEYER, T. (2008): Verdichtung. In: DLG e.V. (Hrsg.): *Schonende Bodenbearbeitung - Systemlösungen für Profis*. Frankfurt am Main: DLG Verlag, 2008. 31-40.
- WILDHAGEN, H. (2006): Materialien zur Vorlesung. Agrartechnik, Bodenbearbeitung. Teil: Bodenbearbeitung, Sommersemester 2006, 55 S.
- WÖHLER, V. (1999): Untersuchungen zum Stoff- und Wasserhaushalt eines salzhaltigen Rekultivierungsmaterials im Labor und Freiland. Universität Gesamthochschule Kassel, Diss., 156 S.
- ZACHARIAS, S. (2004): Konservierende Bodenbearbeitung und Hochwasserschutz – Bodenphysikalische Aspekte. Tagungsband zur Fachveranstaltung für Landwirtschaft (LfL) und des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (LfUG), Leipzig, 53-65.
- ZALF - Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V. Müncheberg (2006): <http://www.zalf.de/de/forschung/services/fos/bereiche/Seiten/default.aspx>, 27.03.2012.
- ZECHNER, E. (2001): Neue Selektionsstrategien zur Züchtung von Qualitätshafer speziell für die Nahrungsmittelindustrie. Forschungsprojekt L 1080/97, Endbericht. Ländlicher Raum 2/ 2001, 4 S.
- ZIMMERLING, B., SCHMIDT W. (2002): Beitrag der konservierenden Bodenbearbeitung zum Vorbeugenden Hochwasserschutz. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Schriftenreihe 7, Jahrgang 11. Heft, Dresden. 21-52.

### Eidesstaatliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Promotionsarbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

## Danksagung

An erster Stelle möchte ich Frau Prof. Dr. J. Zeitz und Prof. Dr. F. Ellmer für die Überlassung des Themas danken sowie für die stete Bereitschaft, Unterstützung und Betreuung und für die Möglichkeit der Durchführung der Untersuchungen. Insbesondere geht mein ganz herzlicher Dank an Frau Prof. Dr. J. Zeitz für die fachlichen Anregungen und für jegliche Unterstützung in allen Phasen der Arbeit in stets guter Atmosphäre, was mich sehr motiviert hat.

Mein Dank gilt dem DAAD (Deutscher Akademischer Austauschdienst) für die Gewährung eines Stipendiums für zwei Jahre, das die Forschung dieser Arbeit ermöglicht hat.

Bei Herrn Assoc. Prof. Dr. O. Erekul bedanke ich mich ganz herzlich für die Bereitschaft und Unterstützung, für seine fachlichen Ratschläge und kritischen Hinweise, für seine außerordentliche persönliche Unterstützung, welche mich fachlich sehr motiviert hat während meines Aufenthaltes in Deutschland als auch in der Türkei an der Adnan Menderes Universität.

Ein ganz spezieller Dank an Herrn H. Vogel für die Unterstützung und fachlichen Ratschläge bei der Feldarbeit des Versuchs DIII am Standort Berlin-Dahlem und für die Hilfe bei der Aufbereitung des Datenmaterials. Auch Herrn J. Schmidt, technischer Leiter der Versuchsstation in Berlin-Dahlem, mit seinem Team danke ich für die Unterstützungen während der Feldarbeit.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. F.-M. Chmielewski danke ich für die Bereitstellung der Agrarmeteorologischen Daten.

Frau Dr. agr. B. Kroschewski bin ich für die Beratung zur statistischen Auswertung des Datenmaterials sehr dankbar.

Weiterhin danke ich Herrn Dr. G. Verch, Leiter der Forschungsstation Dedelow, für die freundliche Aufnahme in die Forschungsstation und allen seinen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen, besonders Frau Wolf, für die Unterstützung und stete Bereitschaft bei der Durchführung der Feldarbeit.



Auch bei Frau Dr. K. Weiß, Frau G. Sommer, Frau M. Alt, Frau R. Krause und Frau I. Dutschke bedanke ich mich herzlich für die Unterstützung und für die Betreuung bei den Laborarbeiten.

Ein spezieller Dank an Herrn N. Roßkopf und Frau E. Wallor für die stete Bereitschaft und Unterstützung bei der Geländearbeit.

Es ist mir ein besonderes Bedürfnis Frau M. Launert, die mich von Anfang bis zum Ende meines Aufenthaltes im Fachgebiet stets motiviert hat, an dieser Stelle zu danken.

Allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen des Fachgebietes Bodenkunde und Standortlehre, Acker- und Pflanzenbau danke ich für die geleistete Unterstützung und die freundliche Arbeitsatmosphäre.

Schließlich möchte ich mich ganz herzlich bei Frau M. Waniek für ihre Hilfe bei der Korrektur der schriftlichen Arbeit bedanken.

Einen **ganz besonderen Dank an meine Frau Feride**, die mich stets die ganze Tour begleitet und mir so viel geholfen hat.

## Anhang

## Verzeichnis der Tabellen im Anhang

Tab. A1:	Bodenarten bei flacher Bodenbearbeitung in 10 - 15 cm und 20 - 25 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem, 2006)	151
Tab. A2:	Bodenarten bei tiefer Bodenbearbeitung in 10 - 15 cm und 20 - 25 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem, 2006)	152
Tab. A3:	Bodenarten der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten in 10 - 15 cm und 20 - 25 cm Bodentiefe (Dedelow, 2007)	153
Tab. A4:	KAK <sub>eff</sub> (cmol kg <sup>-1</sup> ), KAK <sub>pot</sub> (cmol kg <sup>-1</sup> ), C <sub>org</sub> - und Tongehalte (%) bei flacher und tiefer Bodenbearbeitung in 10 - 15 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem, 2006)	161
Tab. A5:	KAK <sub>eff</sub> (cmol kg <sup>-1</sup> ), KAK <sub>pot</sub> (cmol kg <sup>-1</sup> ), C <sub>org</sub> - und Tongehalte (%) bei flacher und tiefer Bodenbearbeitung in 20 - 25 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem, 2006)	162
Tab. A6:	Die KAK <sub>pot</sub> -Werte (cmol kg <sup>-1</sup> ) in verschiedenen Bodentiefen der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten (Dedelow, 2007)	163
Tab. A7:	Ausgewählte bodenphysikochemische Eigenschaften bei flacher Bodenbearbeitung in 10 - 15 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem, 2006)	164
Tab. A8:	Ausgewählte bodenphysikochemische Eigenschaften bei tiefer Bodenbearbeitung in 10 - 15 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem, 2006)	165
Tab. A9:	Ausgewählte bodenphysikochemische Eigenschaften bei flacher Bodenbearbeitung in 20 - 25 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem, 2006)	166
Tab. A10:	Ausgewählte bodenphysikochemische Eigenschaften bei tiefer Bodenbearbeitung in 20 - 25 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem, 2006)	167
Tab. A11:	Ausgewählte bodenphysikochemische Eigenschaften der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten in 10 - 15 cm Bodentiefe (Dedelow, 2007)	168
Tab. A12:	Ausgewählte bodenphysikochemische Eigenschaften der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten in 20 - 25 cm Bodentiefe (Dedelow, 2007)	169
Tab. A13:	Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Ertrag und Ertragskomponenten von Winterweizen bei flacher Bodenbearbeitung (Berlin-Dahlem, 2006)	170

Tab. A14:	Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Ertrag und Ertragskomponenten von Winterweizen bei tiefer Bodenbearbeitung (Berlin-Dahlem, 2006)	171
Tab. A15:	Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Ertrag und Ertragskomponenten von Hafer bei flacher Bodenbearbeitung (Berlin-Dahlem, 2006)	172
Tab. A16:	Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Ertrag und Ertragskomponenten von Hafer bei tiefer Bodenbearbeitung (Berlin-Dahlem, 2006)	173
Tab. A17:	Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Kornertrag (dt ha <sup>-1</sup> , 86 % TS) von Winterweizen (langjährige Mittelwerte, 1968 - 2005)	174
Tab. A18:	Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Kornertrag (dt ha <sup>-1</sup> , 86 % TS) von Hafer (langjährige Mittelwerte, 1969 - 2002)	174

## Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

Abb. A1:	Einfluss von verschiedenen Bodenbearbeitungstiefen auf den Durchdringungswiderstand in den verschiedenen „Kalk und Stallmistdünger“ versorgten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, Frühjahr 2006)	154
Abb. A2:	Wasserretentionsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten C <sub>org</sub> -Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Berlin-Dahlem (2006)	155
Abb. A3:	Wasserretentionsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten C <sub>org</sub> -Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Berlin-Dahlem (2006)	155
Abb. A4:	Wasserretentionsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten C <sub>org</sub> -Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Berlin-Dahlem (2006)	156
Abb. A5:	Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten C <sub>org</sub> -Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Berlin-Dahlem (2006)	157
Abb. A6:	Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten C <sub>org</sub> -Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Berlin-Dahlem (2006)	157

Abb. A7:	Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten $C_{org}$ -Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Berlin-Dahlem (2006)	158
Abb. A8:	Wasserretentionsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten $C_{org}$ -Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Dedelow (2007)	159
Abb. A9:	Wasserretentionsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten $C_{org}$ -Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Dedelow (2007)	159
Abb. A10:	Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten $C_{org}$ -Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Dedelow (2007)	160
Abb. A11:	Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten $C_{org}$ -Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Dedelow (2007)	160

Tab. A1: Bodenarten bei flacher Bodenbearbeitung in 10 - 15 cm und 20 - 25 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem, 2006)

Bodenbearbeitung	Prüfglieder	Parzellen Nr.	Tiefe (10-15 cm)				Tiefe (20-25 cm)			
			Sand (%)	Schluff (%)	Ton (%)	Bodenart	Sand (%)	Schluff (%)	Ton (%)	Bodenart
flach (17 cm)	(+) Kalk, (+) Stmd.	1	72,8	21,7	5,4	SL2	78,0	19,2	2,8	SU2
		5	74,5	20,2	5,4	SL2	76,3	15,7	7,9	SL2
		9	72,4	21,9	5,8	SL2	74,9	19,9	5,2	SL2
		13	74,3	23,0	2,6	SU2	78,8	14,6	6,6	SL2
		17	73,0	20,6	6,3	SL2	77,5	17,9	4,6	SU2
		21	75,5	17,5	7,1	SL2	77,3	19,2	3,5	SU2
	(+) Kalk, (-) Stmd.	3	76,7	18,1	5,1	SL2	77,7	17,1	5,2	SL2
		7	74,2	19,2	6,5	SL2	76,8	16,9	6,3	SL2
		11	74,0	20,1	5,9	SL2	72,6	21,7	5,7	SL2
		15	75,0	20,3	4,7	SU2	76,4	18,3	5,3	SL2
		19	73,4	22,0	4,6	SU2	75,4	18,6	6,0	SL2
		23	77,0	17,8	5,3	SL2	76,4	20,2	3,5	SU2
	(-) Kalk, (+) Stmd.	2	77,5	16,5	6,0	SL2	77,4	17,5	5,1	SL2
		6	74,3	18,2	7,5	SL2	75,8	19,8	4,4	SU2
		10	78,8	14,8	6,4	SL2	74,0	19,6	6,4	SL2
		14	74,9	18,9	6,2	SL2	73,4	19,4	7,2	SL2
		18	77,4	17,2	5,4	SL2	69,0	25,4	5,6	SU3
		22	77,3	17,9	4,8	SU2	76,8	19,2	4,0	SU2
	(-) Kalk, (-) Stmd.	4	78,6	16,4	4,9	SU2	78,9	13,5	7,6	SL2
		8	75,3	18,6	6,1	SL2	78,6	16,3	5,1	SL2
		12	76,6	17,7	5,8	SL2	77,0	17,0	5,9	SL2
		16	74,9	17,1	8,0	SL2	72,2	20,5	7,3	SL2
		20	78,9	15,0	6,1	SL2	77,7	16,1	6,3	SL2
		24	76,5	19,8	3,8	SU2	78,0	18,1	3,9	SU2

Tab. A2: Bodenarten bei tiefer Bodenbearbeitung in 10 - 15 cm und 20 - 25 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem, 2006)

Bodenbearbeitung	Prüfglieder	Parzellen Nr.	Tiefe (10-15 cm)				Tiefe (20-25 cm)			
			Sand (%)	Schluff (%)	Ton (%)	Bodenart	Sand (%)	Schluff (%)	Ton (%)	Bodenart
tief (28 cm)	(+) Kalk, (+) Stmd.	25	74,8	19,9	5,3	SL2	75,1	20,3	4,6	SU2
		29	76,1	19,1	4,8	SU2	75,6	20,8	3,6	SU2
		33	75,3	20,5	4,2	SU2	72,8	22,4	4,8	SU2
		37	76,0	19,1	4,9	SU2	75,0	19,8	5,1	SL2
		41	77,2	17,7	5,1	SL2	79,9	15,4	4,7	SU2
		45	77,0	17,2	5,8	SL2	77,9	17,3	4,8	SU2
	(+) Kalk, (-) Stmd.	27	74,1	21,3	4,6	SU2	76,8	19,6	3,6	SU2
		31	76,9	19,6	3,5	SU2	75,5	21,3	3,2	SU2
		35	76,3	18,3	5,4	SL2	78,4	17,2	4,4	SU2
		39	76,7	17,6	5,7	SL2	74,1	20,5	5,4	SL2
		43	76,3	18,6	5,1	SL2	79,0	15,8	5,2	SL2
		47	77,2	16,9	6,0	SL2	77,5	17,3	5,3	SL2
	(-) Kalk, (+) Stmd.	26	75,2	19,6	5,2	SL2	74,6	20,1	5,3	SL2
		30	75,1	19,9	5,0	SL2	75,8	20,4	3,8	SU2
		34	75,9	18,7	5,4	SL2	76,2	18,0	5,8	SL2
		38	72,6	21,4	5,9	SL2	75,9	18,3	5,8	SL2
		42	77,5	17,0	5,6	SL2	76,0	18,0	6,0	SL2
		46	78,8	15,2	6,0	SL2	79,0	15,1	6,0	SL2
	(-) Kalk, (-) Stmd.	28	77,2	18,0	4,8	SU2	77,9	17,2	4,9	SU2
		32	73,9	20,7	5,3	SL2	75,3	17,0	7,7	SL2
		36	75,7	18,6	5,7	SL2	73,5	20,9	5,6	SL2
		40	75,2	19,9	4,8	SU2	75,5	19,5	5,0	SL2
		44	78,1	15,9	6,0	SL2	76,5	17,8	5,7	SL2
		48	80,0	14,3	5,7	SL2	81,6	13,8	4,6	SU2

Tab. A3: Bodenarten der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten in 10 - 15 cm und 20 - 25 cm Bodentiefe (Dedelow, 2007)

Bodenbearbeitungsvarianten	Parzellen Nr.	Tiefe (10-15cm)				Tiefe (20-25cm)			
		Sand (%)	Schluff (%)	Ton (%)	Bodenart	Sand (%)	Schluff (%)	Ton (%)	Bodenart
<b>Direktsaat</b>	1	68,9	21,9	9,2	SI3	70,0	21,0	9,0	SI3
	2	68,1	23,2	8,6	SI3	69,1	22,1	8,8	SI3
	3	64,3	25,1	10,6	SI3	63,4	26,9	9,7	SI3
	4	62,6	24,1	13,4	SI4	52,5	25,7	21,8	Ls4
<b>Grubber (10 cm)</b>	5	69,0	22,1	8,9	SI3	67,4	26,2	6,4	Su3
	6	70,4	22,4	7,2	SI2	68,2	24,3	7,4	SI2
	7	66,5	27,0	6,5	Su3	66,8	26,2	7,0	Su3
	8	67,6	24,3	8,1	SI3	69,6	21,3	9,1	SI3
<b>Grubber (15 cm)</b>	9	69,5	22,4	8,1	SI3	68,3	24,2	7,5	SI2
	10	67,3	25,4	7,3	Su3	68,1	24,4	7,6	SI2
	11	68,2	24,6	7,2	SI2	63,6	29,7	6,7	Su3
	12	63,9	28,5	7,6	Su3	65,2	26,7	8,1	SI3
<b>Pflug (15 cm)</b>	13	63,2	28,9	7,9	Su3	63,5	28,4	8,2	SI3
	14	66,1	27,1	6,7	Su3	67,3	26,3	6,4	Su3
	15	71,0	23,7	5,3	SI2	71,6	23,8	4,6	Su2
	16	66,6	28,0	5,4	Su3	66,5	28,2	5,3	Su3
<b>Pflug (25 cm)</b>	17	68,1	23,8	8,2	SI3	63,2	24,8	12,0	SI4
	18	69,5	25,1	5,3	Su3	69,8	23,6	6,6	SI2
	19	70,6	24,0	5,4	SI2	66,5	29,9	3,6	Su3
	20	70,7	24,8	4,5	Su2	68,4	26,0	5,7	Su3



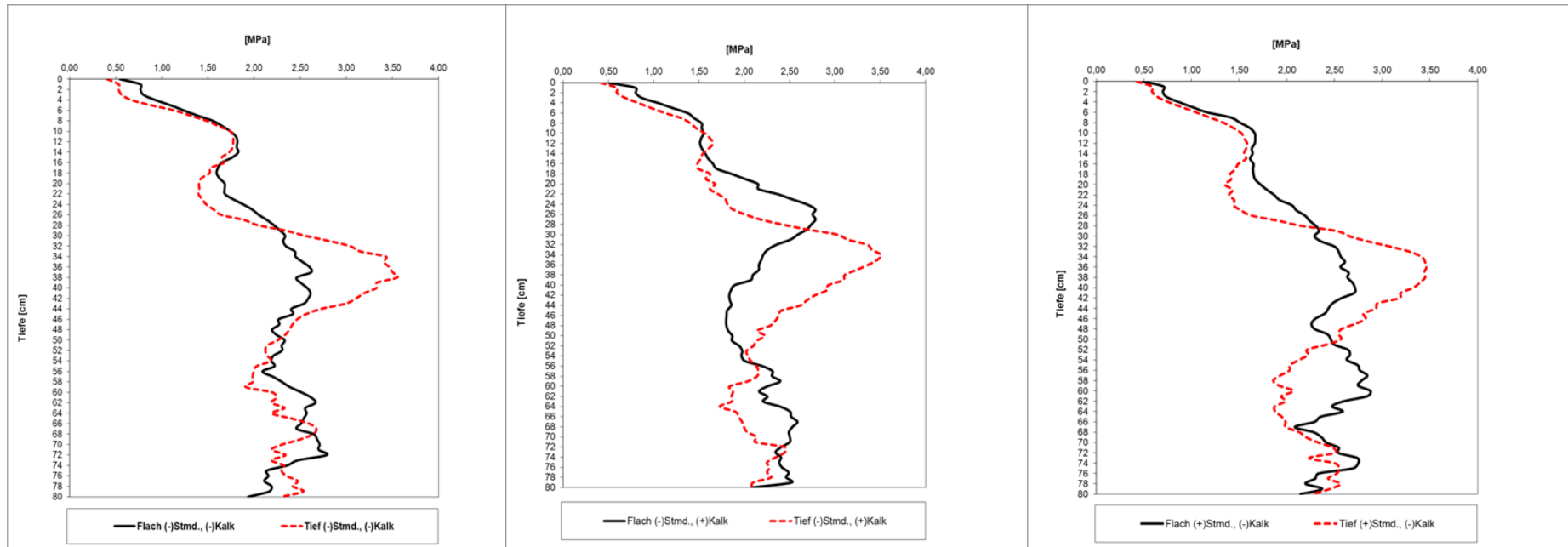


Abb. A1: Einfluss von verschiedenen Bodenbearbeitungstiefen auf den Durchdringungswiderstand in den verschiedenen „Kalk und Stallmistdünger“ versorgten Prüfgliedern (Berlin-Dahlem, Frühjahr 2006)

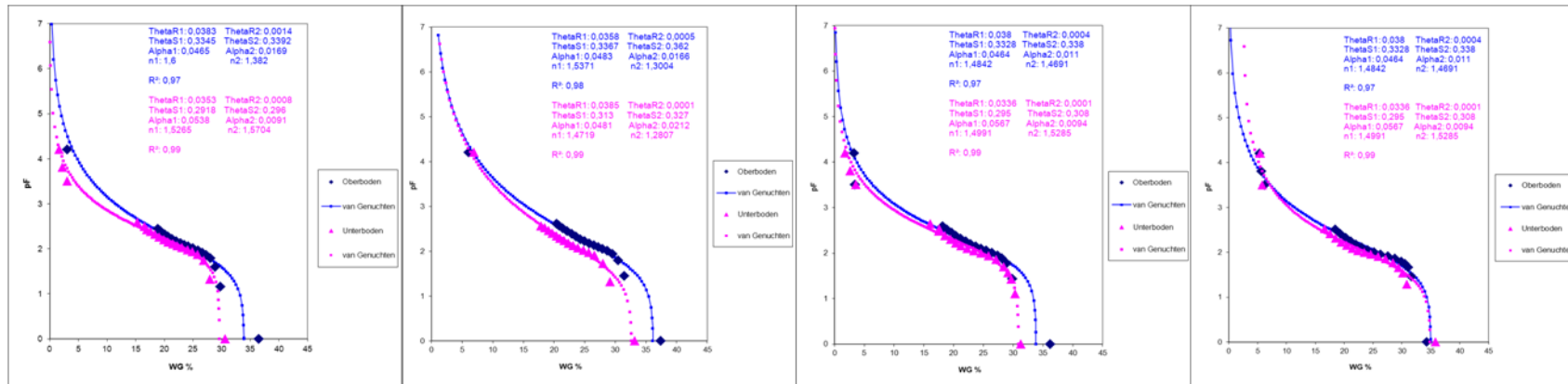


Abb. A2: Wasserretentionsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten Corg-Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Berlin-Dahlem (2006) (Parzellen Nummern von links nach rechts; 2,5 6 und 7)

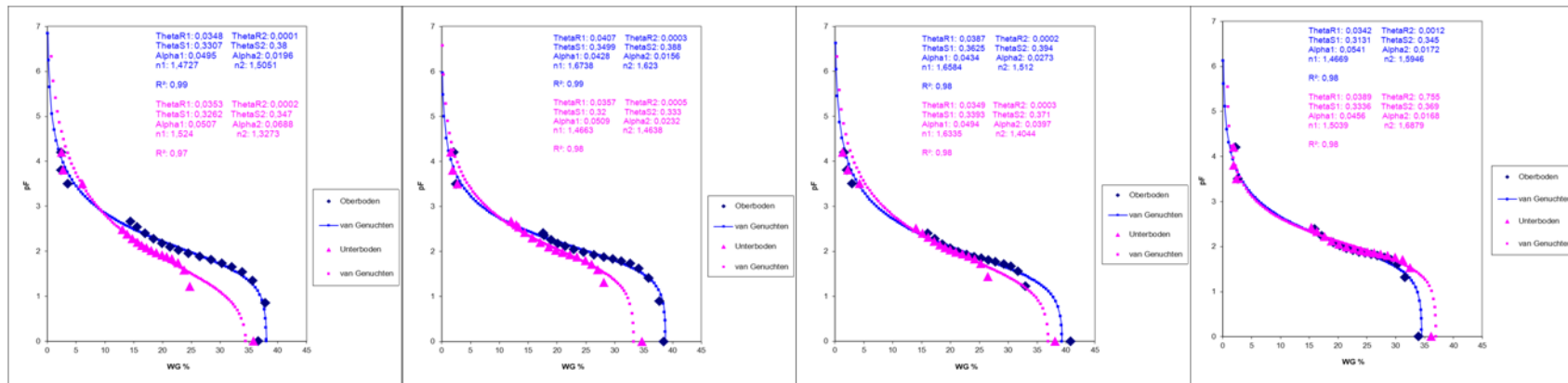


Abb. A3: Wasserretentionsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten Corg-Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Berlin-Dahlem (2006) (Parzellen Nummern von links nach rechts; 9,10,23 und 32)

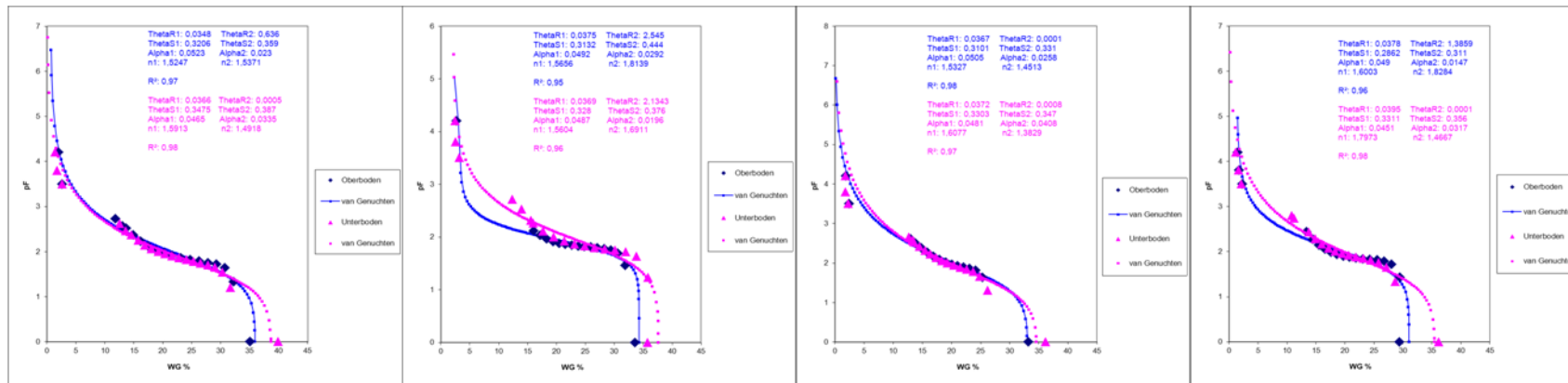


Abb. A4: Wasserretentionsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten Corg-Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Berlin-Dahlem (2006) (Parzellen Nummern von links nach rechts; 40,44,47 und 48)

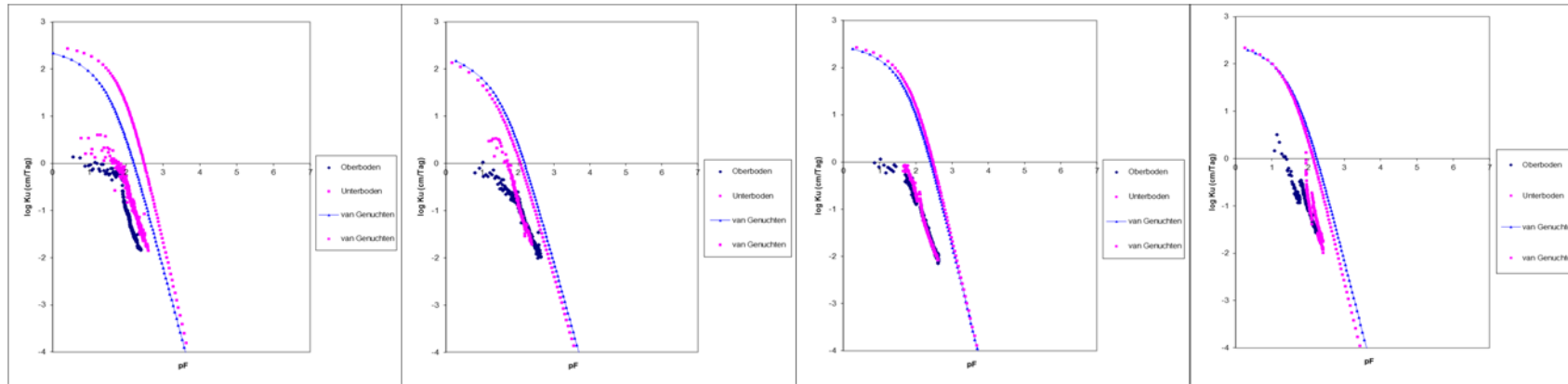


Abb. A5: Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten Corg-Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Berlin-Dahlem (2006) (Parzellen Nummern von links nach rechts; 2,5 6 und 7)

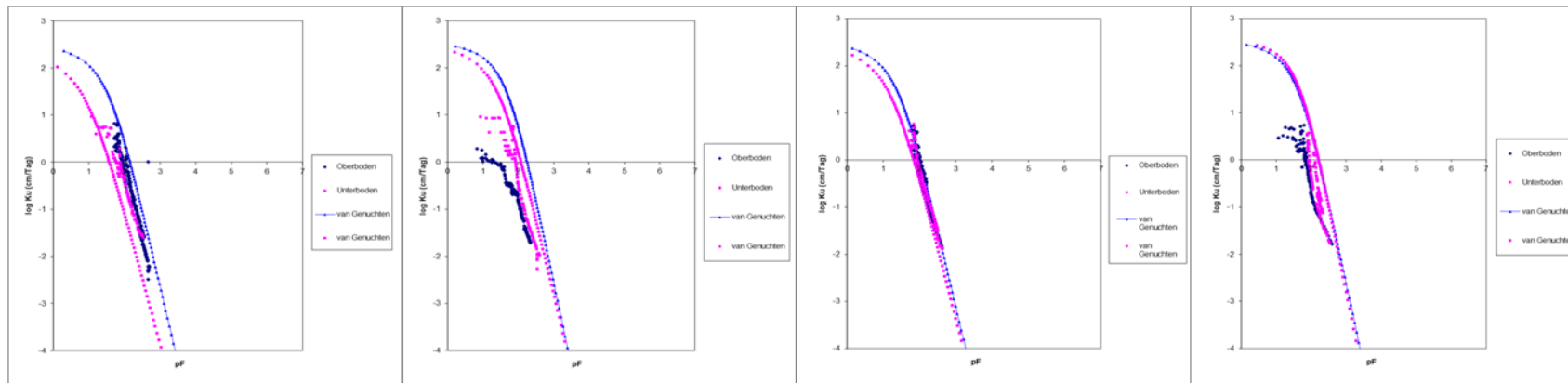


Abb. A6: Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten Corg-Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Berlin-Dahlem (2006) (Parzellen Nummern von links nach rechts; 9,10,23 und 32)

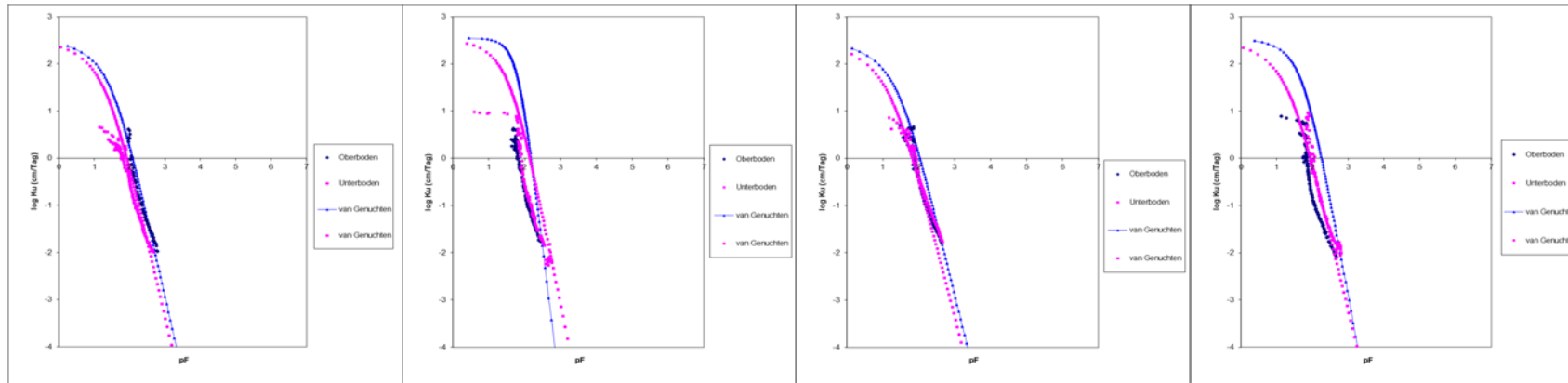


Abb. A7: Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten Corg-Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Berlin-Dahlem (2006) (Parzellen Nummern von links nach rechts; 40,44,47 und 48)

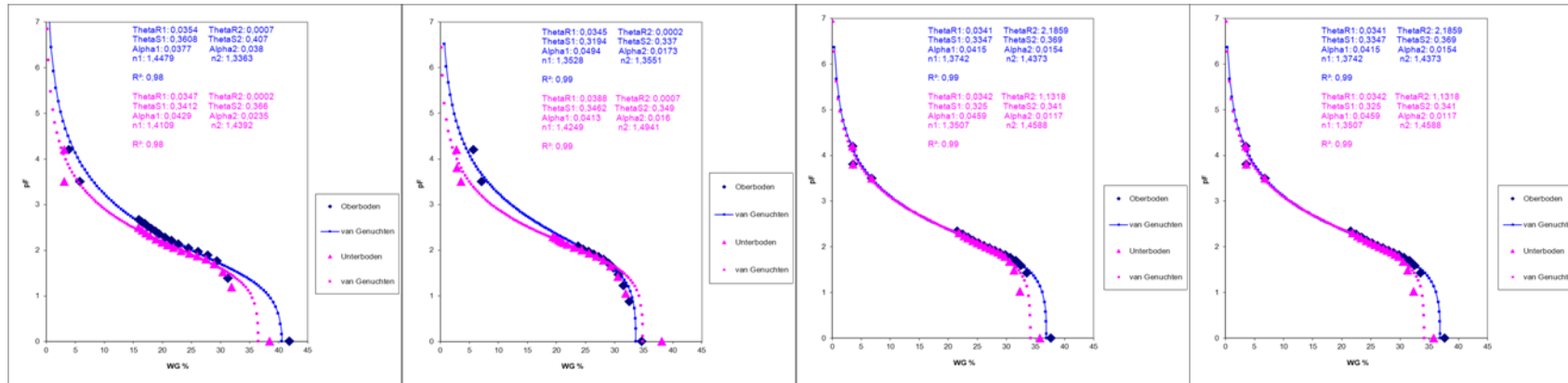


Abb. A8: Wasserretentionsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten Corg-Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Dedelow (2007) (Parzellen Nummern von links nach rechts; 7,8,12 und 13)

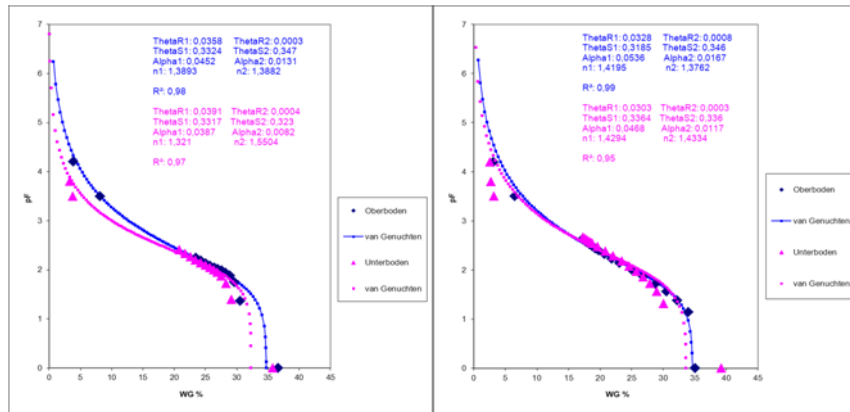


Abb. A9: Wasserretentionsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten Corg-Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Dedelow (2007) (Parzellen Nummern von links nach rechts; 17 und 19)

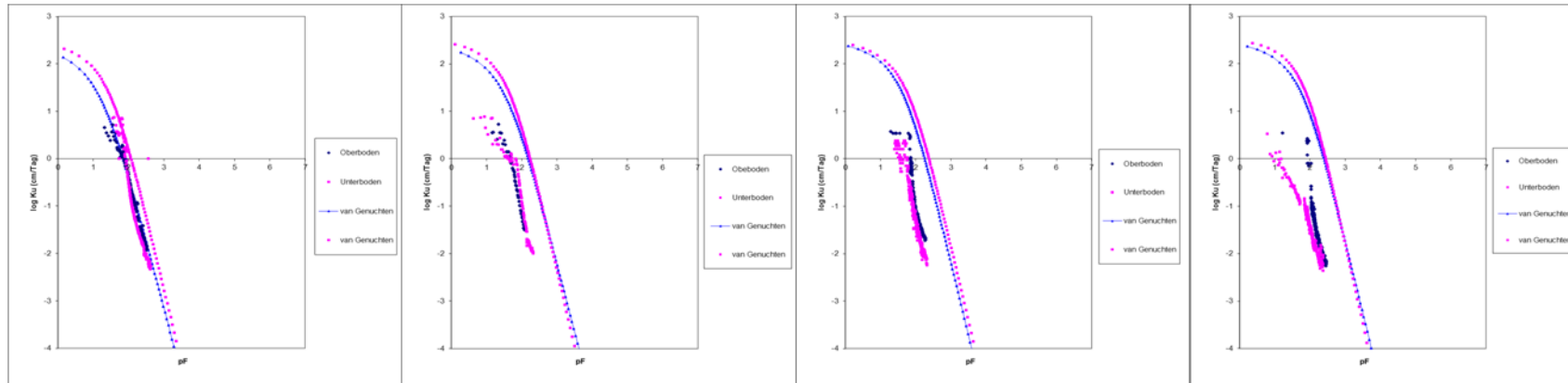


Abb. A10: Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten Corg-Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Dedelow (2007) (Parzellen Nummern von links nach rechts; 7,8,12 und 13)

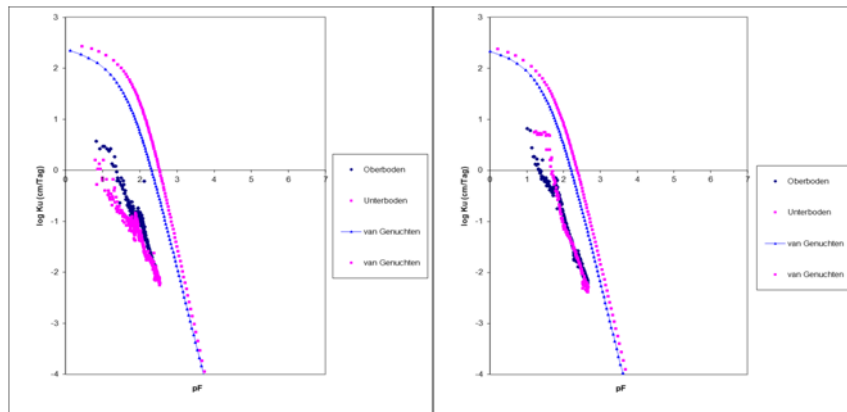


Abb. A11: Ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der ausgewählten Corg-Gehalt (%) – Parzellen im Ober- und Unterboden (10 - 15 cm und 20 - 25 cm), Dedelow (2007) (Parzellen Nummern von links nach rechts; 17 und 19)

Tab. A4: KAK<sub>eff</sub> (cmol kg<sup>-1</sup>), KAK<sub>pot</sub> (cmol kg<sup>-1</sup>), C<sub>org</sub>- und Tongehalte (%) bei flacher und tiefer Bodenbearbeitung in 10 - 15 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem; 2006)

Bodenbearbeitung	Prüfglieder	Parzellen Nr.	Tiefe (10-15 cm)			
			Ton (%)	C <sub>org</sub> (%)	KAK <sub>pot</sub> (cmol kg <sup>-1</sup> )	KAK <sub>eff</sub> (cmol kg <sup>-1</sup> )
flach	mit Kalk, mit Stmd.	13	2,6	1,26	8,05	6,31
flach	mit Kalk, mit Stmd.	5	5,4	1,16	9,89	4,48
flach	ohne Kalk, mit Stmd.	2	6,0	1,11	9,05	4,40
flach	mit Kalk, mit Stmd.	9	5,8	1,05	8,77	4,94
flach	ohne Kalk, mit Stmd.	6	7,5	1,04	8,76	7,77
flach	mit Kalk, ohne Stmd.	7	6,5	1,02	9,67	5,99
flach	ohne Kalk, mit Stmd.	10	6,4	1,02	7,96	4,71
flach	mit Kalk, mit Stmd.	1	5,4	0,95	9,08	8,05
tief	mit Kalk, ohne Stmd.	39	5,7	0,60	5,50	5,29
tief	ohne Kalk, ohne Stmd.	32	5,3	0,57	6,72	3,04
flach	mit Kalk, ohne Stmd.	23	5,3	0,55	6,55	6,58
tief	mit Kalk, ohne Stmd.	47	6,0	0,53	6,70	6,05
tief	ohne Kalk, ohne Stmd.	44	6,0	0,53	6,01	3,39
tief	ohne Kalk, ohne Stmd.	40	4,8	0,52	5,64	2,85
tief	ohne Kalk, ohne Stmd.	48	5,7	0,50	5,57	2,34
tief	ohne Kalk, mit Stmd.	46	6,0	0,49	6,21	2,97



Tab. A5: KAK<sub>eff</sub> (cmol kg<sup>-1</sup>), KAK<sub>pot</sub> (cmol kg<sup>-1</sup>), C<sub>org</sub>- und Tongehalte (%) bei flacher und tiefer Bodenbearbeitung in 20 - 25 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem; 2006)

Bodenbearbeitung	Prüfglieder	Parzellen Nr.	Tiefe (20-25 cm)			
			Ton (%)	C <sub>org</sub> (%)	KAK <sub>pot</sub> (cmol kg <sup>-1</sup> )	KAK <sub>eff</sub> (cmol kg <sup>-1</sup> )
flach	mit Kalk, mit Stmd.	13	6,6	0,94	7,71	6,68
flach	mit Kalk, mit Stmd.	5	8,0	0,96	9,30	4,63
flach	ohne Kalk, mit Stmd.	2	5,1	0,73	7,18	4,05
flach	mit Kalk, mit Stmd.	9	5,2	0,75	7,65	3,28
flach	ohne Kalk, mit Stmd.	6	4,4	0,50	7,42	7,46
flach	mit Kalk, ohne Stmd.	7	6,3	0,76	7,82	7,74
flach	ohne Kalk, mit Stmd.	10	6,4	0,60	6,40	4,15
flach	mit Kalk, mit Stmd.	1	2,8	0,56	7,48	6,75
tief	mit Kalk, ohne Stmd.	39	5,4	0,60	6,38	5,88
tief	ohne Kalk, ohne Stmd.	32	7,7	0,59	6,47	3,24
flach	mit Kalk, ohne Stmd.	23	3,5	0,55	6,72	5,03
tief	mit Kalk, ohne Stmd.	47	5,3	0,51	5,77	5,19
tief	ohne Kalk, ohne Stmd.	44	5,7	0,50	5,70	3,17
tief	ohne Kalk, ohne Stmd.	40	5,0	0,49	5,94	3,56
tief	ohne Kalk, ohne Stmd.	48	4,6	0,45	5,47	3,09
tief	ohne Kalk, mit Stmd.	46	6,0	0,50	5,72	3,35

Tab. A6: Die KAK<sub>pot</sub>-Werte (cmol kg<sup>-1</sup>) in verschiedenen Bodentiefen der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten (Dedelow, 2007)

Bodenbearbeitungsvarianten	KAK <sub>pot</sub> (cmol kg <sup>-1</sup> )		
	Parzellen Nr.	Tiefe (10-15 cm)	Tiefe (20-25 cm)
<b>Direktsaat</b>	1	5,08	5,07
	2	4,80	4,09
	3	6,58	6,24
	4	6,36	9,36
<b>Grubber (10 cm)</b>	5	5,06	4,70
	6	4,55	4,87
	7	4,89	5,38
	8	5,63	5,61
<b>Grubber (15 cm)</b>	9	5,08	9,89
	10	4,93	5,43
	11	5,04	5,06
	12	6,57	5,02
<b>Pflug (15 cm)</b>	13	5,83	5,23
	14	5,45	5,17
	15	5,51	4,66
	16	5,48	4,61
<b>Pflug (25 cm)</b>	17	6,78	7,21
	18	5,70	5,17
	19	4,54	4,96
	20	5,51	5,01

Tab. A7: Ausgewählte bodenphysikochemische Eigenschaften bei flacher Bodenbearbeitung in 10 - 15 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem, 2006)

Bodenbearbeitung	Prüfglieder	Parzellen Nr.	Tiefe (10-15 cm)						
			pH- Wert	C <sub>t</sub> (%)	N <sub>t</sub> (%)	C <sub>hwl</sub> -Gehalt (mg 100 g <sup>-1</sup> )	N <sub>hwl</sub> -Gehalt (mg 100 g <sup>-1</sup> )	C/N- Verhältnis	Aggregat St. (%)
flach (17 cm)	(+) Kalk, (+) Stmd.	1	5,6	0,95	0,060	39,31	11,04	18,05	18,96
		5	5,6	1,16	0,094	50,87	10,70	12,64	19,11
		9	5,5	1,05	0,073	47,42	8,26	14,44	17,67
		13	5,3	1,26	0,096	47,97	9,72	13,05	19,81
		17	5,4	0,91	0,060	35,55	10,77	15,18	18,29
		21	5,6	0,87	0,064	34,71	9,39	13,56	18,69
	(+) Kalk, (-) Stmd.	3	5,2	0,90	0,055	34,46	8,78	16,56	18,09
		7	5,4	1,03	0,076	40,94	7,58	13,45	18,71
		11	5,2	0,86	0,055	36,69	6,41	15,61	14,11
		15	5,5	0,76	0,053	32,07	10,14	14,43	11,94
		19	5,6	0,76	0,058	29,72	8,19	13,19	18,71
		23	5,5	0,56	0,037	45,94	7,68	15,11	11,47
	(-) Kalk, (+) Stmd.	2	3,8	1,12	0,076	54,00	12,07	14,77	17,54
		6	3,8	1,05	0,072	59,87	9,62	14,65	19,05
		10	3,9	1,02	0,069	57,15	8,05	14,84	22,69
		14	3,8	0,88	0,061	47,87	6,70	14,41	15,70
		18	3,9	0,90	0,062	43,37	10,01	14,64	16,39
		22	3,9	0,90	0,064	46,45	9,68	14,13	16,80
	(-) Kalk, (-) Stmd.	4	3,4	0,86	0,057	45,55	7,63	15,13	16,49
		8	3,5	0,88	0,056	48,22	7,28	15,81	17,65
		12	3,4	0,82	0,054	50,11	5,68	15,35	16,93
		16	3,4	0,85	0,054	40,46	8,59	15,75	10,72
		20	3,5	0,76	0,048	38,67	7,59	15,77	16,59
		24	3,5	0,65	0,041	33,13	6,34	15,98	14,05

Tab. A8: Ausgewählte bodenphysikochemische Eigenschaften bei tiefer Bodenbearbeitung in 10 - 15 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem, 2006)

Bodenbearbeitung	Prüfglieder	Parzellen Nr.	Tiefe (10-15 cm)						
			pH- Wert	C <sub>t</sub> (%)	N <sub>t</sub> (%)	C <sub>hwl</sub> -Gehalt (mg 100 g <sup>-1</sup> )	N <sub>hwl</sub> -Gehalt (mg 100 g <sup>-1</sup> )	C/N- Verhältnis	Aggregat St. (%)
tief (28 cm)	(+) Kalk, (+) Stmd.	25	5,9	0,84	0,061	27,52	7,68	14,30	11,88
		29	5,7	0,78	0,054	23,85	11,92	14,31	16,34
		33	5,5	0,78	0,057	30,72	15,36	13,71	16,34
		37	6,2	0,67	0,048	25,77	12,89	13,99	10,80
		41	5,8	0,71	0,051	24,46	12,23	13,89	13,48
		45	5,6	0,63	0,046	29,01	8,14	13,44	10,96
	(+) Kalk, (-) Stmd.	27	5,3	0,63	0,045	40,57	8,75	14,04	12,06
		31	5,6	0,66	0,047	22,32	11,16	14,02	15,02
		35	6,3	0,64	0,045	24,01	12,00	14,38	11,38
		39	6,3	0,60	0,042	21,11	10,56	14,37	13,76
		43	6,1	0,72	0,049	21,41	10,71	14,98	15,00
		47	6,1	0,54	0,037	22,06	5,53	14,46	12,72
	(-) Kalk, (+) Stmd.	26	3,9	0,72	0,052	33,10	6,82	13,90	9,41
		30	4,2	0,69	0,049	35,40	17,70	14,00	11,12
		34	5,7	0,75	0,055	29,32	14,66	16,39	16,30
		38	4,3	0,78	0,059	28,30	14,15	13,19	9,11
		42	4,0	0,62	0,042	29,47	14,74	14,53	18,84
		46	4,0	0,50	0,035	23,56	5,60	13,99	13,58
	(-) Kalk, (-) Stmd.	28	3,7	0,66	0,045	26,03	6,41	14,73	9,06
		32	4,0	0,57	0,041	27,95	13,97	13,91	19,09
		36	5,1	0,63	0,046	26,75	13,38	13,78	13,62
		40	3,7	0,53	0,037	25,77	12,88	14,18	10,88
		44	3,7	0,53	0,038	28,08	9,92	14,08	8,45
		48	4,0	0,50	0,033	19,14	3,88	15,23	8,63

Tab. A9: Ausgewählte bodenphysikochemische Eigenschaften bei flacher Bodenbearbeitung in 20 - 25 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem, 2006)

Bodenbearbeitung	Prüfglieder	Parzellen Nr.	Tiefe (20-25 cm)						
			pH- Wert	C <sub>t</sub> (%)	N <sub>t</sub> (%)	C <sub>hwl</sub> -Gehalt (mg 100 g <sup>-1</sup> )	N <sub>hwl</sub> -Gehalt (mg 100 g <sup>-1</sup> )	C/N- Verhältnis	Aggregat St. (%)
flach (17 cm)	(+) Kalk, (+) Stmd.	1	5,7	0,56	0,043	21,84	6,17	13,15	22,13
		5	5,7	0,96	0,076	30,11	7,60	12,72	16,57
		9	5,6	0,75	0,058	35,65	8,73	12,76	13,65
		13	5,5	0,94	0,076	50,96	12,04	12,34	16,05
		17	5,6	0,50	0,049	21,00	6,13	10,33	13,65
		21	5,9	0,77	0,063	28,89	7,12	13,41	11,58
	(+) Kalk, (-) Stmd.	3	5,6	0,68	0,049	25,12	6,25	13,89	12,05
		7	5,6	0,76	0,058	28,50	6,73	13,03	20,80
		11	5,5	0,74	0,056	33,74	8,34	13,06	14,39
		15	5,4	0,57	0,048	20,66	5,31	11,97	13,84
		19	5,9	0,70	0,052	23,90	5,63	13,64	15,59
		23	5,8	0,55	0,043	18,50	4,13	14,11	17,00
	(-) Kalk, (+) Stmd.	2	3,8	0,73	0,056	42,73	8,56	13,17	16,07
		6	4,1	0,50	0,038	25,76	5,68	13,09	13,81
		10	4,1	0,60	0,049	36,40	8,68	12,26	17,63
		14	3,9	0,70	0,056	40,20	9,00	12,44	17,96
		18	3,9	0,70	0,055	36,54	8,04	14,36	16,81
		22	3,9	0,63	0,050	31,41	6,93	13,2	14,59
	(-) Kalk, (-) Stmd.	4	3,5	0,72	0,046	29,98	5,44	15,68	23,54
		8	3,6	0,71	0,052	42,78	7,11	13,5	19,45
		12	3,5	0,65	0,048	42,63	7,46	13,48	18,66
		16	3,5	0,59	0,047	27,90	5,17	12,67	15,31
		20	3,5	0,59	0,046	27,22	4,99	13,85	14,02
		24	3,6	0,59	0,045	27,98	4,88	14,47	14,61

Tab. A10: Ausgewählte bodenphysikochemische Eigenschaften bei tiefer Bodenbearbeitung in 20 - 25 cm Bodentiefe (Berlin-Dahlem, 2006)

Bodenbearbeitung	Prüfglieder	Parzellen Nr.	Tiefe (20-25 cm)						
			pH- Wert	C <sub>t</sub> (%)	N <sub>t</sub> (%)	C <sub>hwl</sub> -Gehalt (mg 100 g <sup>-1</sup> )	N <sub>hwl</sub> -Gehalt (mg 100 g <sup>-1</sup> )	C/N- Verhältnis	Aggregat St. (%)
tief (28 cm)	(+) Kalk, (+) Stmd.	25	6,0	0,83	0,061	27,84	6,65	14,11	13,07
		29	5,8	0,71	0,053	23,22	9,55	13,61	14,46
		33	5,8	0,78	0,056	29,52	7,52	14,00	15,42
		37	6,1	0,66	0,049	24,12	5,98	13,48	11,58
		41	5,9	0,67	0,052	26,31	9,58	12,96	11,22
		45	6,0	0,68	0,050	25,84	8,20	13,66	12,52
	(+) Kalk, (-) Stmd.	27	5,8	0,60	0,048	20,79	5,24	13,92	13,82
		31	5,8	0,64	0,045	20,55	7,80	14,10	15,48
		35	6,3	0,58	0,041	21,23	5,47	14,08	14,99
		39	6,2	0,60	0,043	25,99	5,65	13,82	12,25
		43	6,0	0,57	0,041	21,54	6,73	14,12	11,48
		47	6,1	0,51	0,035	19,49	5,51	14,38	11,44
	(-) Kalk, (+) Stmd.	26	4,0	0,67	0,054	34,18	6,83	13,06	15,22
		30	4,0	0,59	0,046	30,11	9,89	12,95	14,66
		34	5,7	0,73	0,056	25,21	6,18	13,14	16,55
		38	4,1	0,62	0,046	29,26	6,31	13,56	9,02
		42	3,9	0,60	0,044	30,53	8,78	13,51	11,10
		46	4,2	0,50	0,037	27,36	6,79	13,55	12,31
	(-) Kalk, (-) Stmd.	28	3,7	0,67	0,043	28,95	5,11	17,17	13,09
		32	3,9	0,59	0,043	27,01	5,71	13,72	16,56
		36	5,1	0,60	0,045	23,55	5,59	13,35	12,67
		40	3,7	0,49	0,033	26,67	7,15	14,86	8,51
		44	3,7	0,50	0,039	29,53	7,79	12,85	15,53
		48	3,9	0,43	0,030	19,28	4,37	14,10	9,89

Tab. A11: Ausgewählte bodenphysikochemische Eigenschaften der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten in 10 - 15 cm Bodentiefe (Dedelow, 2007)

Bodenbearbeitungsvarianten	Parzellen Nr.	Tiefe (10-15 cm)						
		pH- Wert	C <sub>t</sub> (%)	N <sub>t</sub> (%)	C <sub>hwl</sub> - Gehalt (mg 100 g <sup>-1</sup> )	N <sub>hwl</sub> - Gehalt (mg 100 g <sup>-1</sup> )	C/N- Verhältnis	Aggregat St. (%)
<b>Direktsaat</b>	1	5,03	0,58	0,059	46,50	6,14	9,86	20,18
	2	4,74	0,58	0,058	39,73	5,52	9,92	25,13
	3	5,46	0,64	0,067	35,45	5,23	9,57	21,08
	4	6,11	0,66	0,064	37,83	7,08	10,43	28,75
<b>Grubber (10 cm)</b>	5	5,94	0,85	0,066	56,11	6,70	12,81	33,07
	6	5,51	0,65	0,064	36,99	5,33	10,08	36,22
	7	5,60	0,70	0,066	58,44	7,22	10,60	24,56
	8	5,64	0,73	0,062	45,48	6,18	11,86	21,39
<b>Grubber (15 cm)</b>	9	5,49	0,78	0,064	53,19	5,87	12,24	24,38
	10	5,66	0,71	0,057	40,53	5,21	12,48	21,06
	11	5,61	0,70	0,063	34,29	5,10	11,09	26,28
	12	5,52	0,74	0,073	35,19	5,57	10,18	23,96
<b>Pflug (15 cm)</b>	13	5,52	0,81	0,075	44,46	5,41	10,80	20,52
	14	5,72	0,77	0,067	33,47	4,77	11,46	21,14
	15	5,70	0,73	0,069	42,38	7,70	10,59	19,79
	16	5,41	0,87	0,078	54,11	7,90	11,16	28,70
<b>Pflug (25 cm)</b>	17	5,89	0,71	0,062	31,36	4,78	11,43	22,34
	18	6,21	0,69	0,064	35,24	4,97	10,91	19,39
	19	5,85	0,72	0,077	37,27	5,48	9,31	18,53
	20	5,74	0,81	0,075	41,84	7,60	10,86	20,65

Tab. A12: Ausgewählte bodenphysikochemische Eigenschaften der untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten in 20 - 25 cm Bodentiefe (Dedelow, 2007)

Bodenbearbeitungsvarianten	Parzellen Nr.	Tiefe (20-25 cm)						
		pH- Wert	C <sub>t</sub> (%)	N <sub>t</sub> (%)	C <sub>hwl</sub> - Gehalt (mg 100 g <sup>-1</sup> )	N <sub>hwl</sub> - Gehalt (mg 100 g <sup>-1</sup> )	C/N- Verhältnis	Aggregat St. (%)
<b>Direktsaat</b>	1	4,88	0,64	0,055	24,13	4,55	11,63	24,45
	2	5,22	0,50	0,048	17,73	4,11	10,61	33,08
	3	6,01	0,58	0,056	21,62	4,59	10,24	27,69
	4	6,18	0,60	0,052	15,49	4,94	11,39	28,53
<b>Grubber (10 cm)</b>	5	5,85	0,74	0,067	12,77	2,38	11,16	33,50
	6	5,76	0,55	0,052	22,48	4,51	10,61	34,90
	7	5,58	0,49	0,049	19,08	4,63	10,11	26,30
	8	5,69	0,55	0,053	21,06	4,42	10,35	41,84
<b>Grubber (15 cm)</b>	9	5,67	0,63	0,063	23,17	4,37	10,06	32,54
	10	5,63	0,70	0,062	27,92	5,11	11,34	27,57
	11	5,49	0,54	0,053	21,03	4,80	10,05	24,78
	12	5,49	0,59	0,057	27,46	5,66	10,21	25,06
<b>Pflug (15 cm)</b>	13	5,71	0,64	0,066	15,78	2,41	9,73	21,89
	14	5,74	0,58	0,058	27,98	4,74	10,02	23,77
	15	5,70	0,57	0,058	28,08	4,65	9,79	27,11
	16	5,39	0,54	0,052	29,79	5,30	10,42	29,74
<b>Pflug (25 cm)</b>	17	6,28	0,42	0,038	26,64	4,69	10,92	21,88
	18	5,87	0,54	0,052	31,56	5,06	10,42	20,83
	19	5,73	0,68	0,069	30,72	5,01	9,78	20,41
	20	5,73	0,71	0,070	31,61	5,32	10,15	20,78



Tab. A13: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Ertrag und Ertragskomponenten von Winterweizen bei flacher Bodenbearbeitung (Berlin-Dahlem, 2006)

Boden- bearbeitung	Prüfglieder	Parzellen Nr.	Keimdichte	Kornertrag	Strohertag	Bestandes- dichte	Kornzahl je Ähre	Tausendkorn- gewicht	Hektoliter- gewicht	Siebsortierung (%)						Rohprotein- gehalt	Stärke- gehalt	Fallzahl
										< 2,0	2,0 - 2,2	2,2 - 2,5	2,5 - 2,8	2,8 - 3,0	> 3,0			
flach (17 cm)			(Pflanzen je m <sup>2</sup> )	(dt ha <sup>-1</sup> ; 86 %TS)	(dt ha <sup>-1</sup> TM)	(Ähren pro m <sup>2</sup> )		(g)	(kg hl <sup>-1</sup> )	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(%)	(s)
	(+) Kalk, (+) Stmd.	1	384	49,9	63,2	n.b.	n.b.	36,3	75,04	2,4	4,0	12,7	19,9	22,8	38,2	10,9	62,8	218
		5	n.b.	62,0	76,5	541	29,7	38,7	76,17	2,0	3,2	9,7	15,1	21,2	48,7	10,2	63,4	202
		9	401	62,7	79,9	n.b.	n.b.	38,1	75,82	2,4	3,7	10,8	14,5	19,8	48,8	10,2	63,5	184
		13	402	57,1	67,4	469	32,9	37,0	75,98	2,2	3,5	10,9	17,7	21,9	43,8	10,9	62,8	204
		17	348	58,4	77,7	534	28,6	38,3	73,40	1,7	3,2	10,7	17,2	23,2	44,1	11,3	62,4	164
		21	n.b.	60,4	78,4	468	34,2	37,8	75,89	1,9	3,0	10,4	20,9	23,0	40,9	11,1	62,5	198
	(+) Kalk, (-) Stmd.	3	361	56,6	69,8	n.b.	n.b.	35,6	75,76	2,1	3,1	11,8	19,9	22,4	40,8	10,8	62,8	188
		7	n.b.	59,8	75,4	458	37,2	35,1	75,30	2,6	4,5	13,7	17,7	21,8	39,6	10,2	63,3	211
		11	392	60,2	69,4	n.b.	n.b.	41,3	74,95	1,7	2,6	7,0	12,7	20,0	56,0	9,7	63,7	214
		15	361	57,6	60,6	499	30,2	38,2	75,93	2,1	3,0	9,7	16,0	21,7	47,4	10,5	63,2	211
		19	378	58,4	71,5	491	31,3	38,1	75,74	1,9	2,9	10,5	18,2	22,2	44,3	10,6	63,2	200
		23	n.b.	31,7	69,0	492	18,7	34,5	73,04	2,2	4,3	13,7	21,6	24,1	34,0	11,3	62,2	228
	(-) Kalk, (+) Stmd.	2	334	50,9	58,0	n.b.	n.b.	39,8	76,90	1,8	3,0	7,9	12,9	18,6	55,8	11,4	62,2	257
		6	n.b.	59,0	60,5	411	36,3	39,5	77,52	2,1	3,1	8,0	14,2	19,3	53,3	11,3	62,5	163
		10	297	51,6	57,8	n.b.	n.b.	41,0	77,09	1,9	2,8	8,8	14,2	18,7	53,7	12,6	61,3	175
		14	281	58,8	61,8	376	36,0	43,5	76,90	1,9	2,6	6,2	12,6	18,3	58,5	11,4	62,1	198
		18	262	46,7	52,3	349	32,4	41,4	76,99	2,1	2,8	8,4	14,3	19,4	53,0	13,3	60,9	176
		22	n.b.	38,1	51,6	338	28,3	39,9	76,71	2,2	3,0	9,3	14,7	17,8	53,0	13,7	60,6	190
	(-) Kalk, (-) Stmd.	4	252	1,2	0,2	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
		8	n.b.	1,2	0,9	160	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
		12	190	1,2	2,0	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
		16	133	1,7	2,9	120	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
		20	236	2,3	3,0	137	6,2	26,8	n.b.	5,3	11,1	21,7	18,5	15,5	27,8	n.b.	n.b.	n.b.
		24	n.b.	0,9	0,8	131	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Tab. A14: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Ertrag und Ertragskomponenten von Winterweizen bei tiefer Bodenbearbeitung (Berlin-Dahlem, 2006)

Boden- bearbeitung	Prüfglieder	Parzellen Nr.	Keimdichte	Kornertrag	Strohertag	Bestandes- dichte	Kornzahl je Ähre	Tausendkorn- gewicht	Hektoliter- gewicht	Siebsortierung (%)						Rohprotein- gehalt	Stärke- gehalt	Fallzahl
										< 2,0	2,0 - 2,2	2,2 - 2,5	2,5 - 2,8	2,8 - 3,0	> 3,0			
			(Pflanzen je m <sup>2</sup> )	(dt ha <sup>-1</sup> ; 86 %TS)	(dt ha <sup>-1</sup> TM)	(Ähren pro m <sup>2</sup> )		(g)	(kg hl <sup>-1</sup> )	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(%)	(s)
tief (28 cm)	(+) Kalk, (+) Stmd.	25	n.b.	59,6	75,7	n.b.	n.b.	34,5	76,31	4,8	4,8	12,0	15,7	23,2	39,5	10,0	63,8	177
		29	304	54,4	62,0	403	35,8	37,6	74,09	4,0	4,3	11,1	18,7	22,1	39,8	10,8	62,9	210
		33	n.b.	53,2	62,9	n.b.	n.b.	36,7	76,29	4,2	4,5	11,9	18,9	22,4	38,2	10,6	63,5	217
		37	324	60,0	64,4	419	43,2	33,1	73,97	3,9	3,4	8,6	13,8	21,4	48,8	9,6	64,0	205
		41	294	52,4	61,9	340	44,9	34,3	75,27	3,7	4,8	13,9	21,1	23,6	32,9	11,5	62,6	180
		45	318	57,5	61,3	414	37,1	37,4	74,52	3,8	3,8	10,2	16,4	24,2	41,7	10,4	63,3	177
	(+) Kalk, (-) Stmd.	27	n.b.	56,9	51,2	n.b.	n.b.	37,4	75,17	3,1	3,8	9,6	15,3	22,2	46,1	9,9	63,7	229
		31	354	43,2	44,1	399	29,3	37,0	76,40	4,5	3,7	8,8	13,5	24,2	45,3	9,8	64,0	202
		35	n.b.	44,8	43,0	n.b.	n.b.	35,9	76,22	4,4	3,9	10,9	16,7	22,7	41,3	10,2	63,7	192
		39	293	48,3	50,6	354	36,8	37,0	74,41	4,5	4,5	9,4	15,0	21,2	45,5	9,3	64,4	222
		43	301	42,5	32,5	348	35,0	34,9	74,31	4,4	4,2	11,2	17,2	24,5	38,6	10,7	62,9	187
		47	282	41,5	49,9	355	34,4	34,0	76,29	4,1	4,5	11,3	16,7	24,2	39,2	10,2	63,4	256
	(-) Kalk, (+) Stmd.	26	n.b.	50,0	60,8	n.b.	n.b.	38,3	77,56	2,6	3,4	9,5	17,0	19,2	48,2	12,0	62,3	158
		30	312	47,0	57,8	397	33,2	35,7	76,36	4,3	4,3	14,3	22,5	20,0	34,6	12,9	61,5	172
		34	n.b.	57,7	66,7	n.b.	n.b.	36,4	76,99	3,7	4,0	10,4	17,4	22,7	41,9	10,5	63,5	154
		38	292	45,1	57,5	360	31,5	39,8	77,16	3,5	3,8	9,1	15,8	18,7	49,1	11,2	62,8	195
		42	220	36,7	35,6	274	34,7	38,6	77,26	3,6	3,8	9,4	15,0	18,2	50,1	12,6	61,9	142
		46	253	45,0	65,7	373	31,0	38,9	78,07	3,8	4,1	9,5	16,1	20,4	46,1	12,2	62,2	153
	(-) Kalk, (-) Stmd.	28	n.b.	8,8	11,5	n.b.	n.b.	28,4	73,72	5,6	10,3	24,6	22,7	15,6	21,3	15,2	59,0	167
		32	318	18,2	22,6	290	20,9	30,0	75,31	4,0	7,0	19,5	22,9	17,9	28,7	14,9	59,6	168
		36	n.b.	52,7	56,4	n.b.	n.b.	40,7	75,27	3,0	3,8	8,3	14,3	19,9	50,7	9,9	64,0	236
		40	267	12,4	17,3	241	17,0	30,1	75,03	5,5	7,8	19,4	21,2	18,1	28,1	14,4	59,9	173
		44	256	7,3	6,9	265	10,4	26,7	73,30	7,2	12,1	24,1	21,1	14,4	21,1	n.b.	n.b.	191
		48	210	17,5	25,0	283	19,5	31,7	75,64	4,4	5,8	17,1	20,8	20,2	31,6	14,2	59,8	201

Tab. A15: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Ertrag und Ertragskomponenten von Hafer bei flacher Bodenbearbeitung (Berlin-Dahlem, 2006)

Boden- bearbeitung	Prüfglieder	Parzellen Nr.	Kornertrag	Bestandes- dichte	Tausendkorn- gewicht	Hektoliter- gewicht	Siebsortierung (%)						Rohprotein- gehalt	Ölgehalt
							< 2,0	2,0 - 2,2	2,2 - 2,5	2,5 - 2,8	2,8 - 3,0	> 3,0		
flach (17 cm)			(dt ha <sup>-1</sup> ; 86 %TS)	(Rispen je m <sup>2</sup> )	(g)	(kg hl <sup>-1</sup> )	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(%)
	(+ Kalk, (+) Stmd.	1	24,3	389	25,4	45,29	23,6	31,9	30,6	11,1	2,0	0,8	13,5	3,8
		5	28,4	356	29,7	49,14	13,0	23,1	35,4	24,5	3,1	1,0	14,7	3,7
		9	25,7	416	27,2	46,66	18,9	26,9	31,8	18,8	2,6	0,9	13,9	3,8
		13	27,5	380	25,4	44,42	22,1	31,3	32,1	12,4	1,4	0,7	14,3	3,6
		17	20,9	386	24,5	42,57	23,0	29,8	29,9	14,3	2,0	0,9	13,2	3,6
		21	23,0	371	26,2	45,62	17,5	25,6	30,4	22,3	3,0	1,2	15,6	4,0
	(+ Kalk, (-) Stmd.	3	20,0	304	26,1	44,92	21,2	31,6	30,8	13,4	2,0	1,1	13,3	3,7
		7	36,6	449	28,9	49,57	12,2	22,6	39,7	21,6	2,7	1,2	13,4	4,0
		11	21,3	377	29,3	48,04	16,4	26,7	32,6	20,6	2,7	1,0	15,2	4,2
		15	20,7	361	26,2	46,99	22,5	31,8	29,9	12,9	2,0	0,9	12,5	4,5
		19	19,5	406	26,7	46,80	20,9	29,1	30,8	16,5	1,9	0,7	14,0	4,0
		23	24,4	350	25,1	45,93	24,2	30,9	29,7	12,5	1,8	0,8	11,7	4,0
	(-) Kalk, (+) Stmd.	2	25,3	313	26,2	46,27	20,4	30,2	31,3	15,5	1,8	0,8	13,4	3,6
		6	30,6	388	28,5	48,59	16,1	29,0	35,9	16,0	2,2	0,7	14,0	4,2
		10	33,7	378	27,9	49,87	12,9	26,3	42,5	15,5	1,8	1,0	13,0	4,3
		14	28,1	362	29,6	48,74	14,9	28,2	35,7	18,1	2,2	0,9	13,6	4,3
		18	26,3	360	30,5	46,97	22,8	31,7	31,6	11,7	1,4	0,8	12,4	4,1
		22	28,4	317	27,4	48,60	15,7	27,9	39,3	14,4	2,0	0,7	13,7	4,0
	(-) Kalk, (-) Stmd.	4	11,4	307	22,7	41,67	25,2	37,8	29,2	6,3	1,0	0,4	8,8	4,0
		8	18,3	385	23,7	43,05	23,9	37,0	30,4	6,9	1,3	0,6	15,5	4,2
		12	13,4	335	25,5	45,53	19,1	35,5	36,4	7,3	1,0	0,6	13,6	4,3
		16	14,1	307	23,6	42,63	25,9	39,1	26,0	7,0	1,6	0,4	15,1	4,0
		20	13,9	375	24,2	43,69	26,0	39,3	27,4	5,5	1,4	0,5	16,0	4,2
		24	20,8	333	27,9	48,54	11,5	28,8	47,6	10,0	1,5	0,7	22,4	4,3

Tab. A16: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Ertrag und Ertragskomponenten von Hafer bei tiefer Bodenbearbeitung (Berlin-Dahlem, 2006)

Boden- bearbeitung	Prüfglieder	Parzellen Nr.	Kornertrag	Bestandes- dichte	Tausendkorn- gewicht	Hektoliter- gewicht	Siebsortierung (%)						Rohprotein- gehalt	Ölgehalt
							< 2,0	2,0 - 2,2	2,2 - 2,5	2,5 - 2,8	2,8 - 3,0	> 3,0		
tief (28 cm)			(dt ha <sup>-1</sup> ; 86 %TS)	(Rispen je m <sup>2</sup> )	(g)	(kg hl <sup>-1</sup> )	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(%)
	(+) Kalk, (+) Stmd.	25	22,8	282	26,8	47,20	21,6	32,2	30,0	13,7	2,1	0,4	13,4	3,9
		29	24,4	404	26,2	45,27	24,6	32,6	28,7	11,6	1,8	0,6	13,6	3,8
		33	43,0	362	29,5	47,14	14,8	26,6	38,5	16,4	2,4	1,3	13,3	4,1
		37	24,2	344	25,9	46,27	23,5	31,8	29,8	12,4	2,0	0,6	13,1	4,0
		41	30,7	297	27,9	47,43	17,0	30,2	35,6	14,6	2,0	0,6	12,5	4,2
		45	21,5	305	26,4	43,41	25,2	34,7	27,4	10,2	1,9	0,6	12,8	3,8
	(+) Kalk, (-) Stmd.	27	22,9	332	25,7	44,67	23,5	34,2	28,0	11,3	2,2	0,9	12,8	4,3
		31	25,7	379	25,0	44,95	25,9	32,7	28,5	10,3	2,0	0,7	13,0	4,2
		35	31,3	330	30,9	49,51	11,7	24,9	40,7	19,6	2,4	0,8	12,9	4,2
		39	22,5	339	23,9	44,69	24,8	33,0	30,3	9,5	1,8	0,6	13,6	4,1
		43	30,2	322	29,8	49,01	12,8	25,5	42,2	16,1	2,5	0,9	13,6	4,7
		47	22,8	310	26,4	46,17	22,8	31,8	32,0	10,9	1,8	0,7	12,8	4,6
	(-) Kalk, (+) Stmd.	26	23,1	430	26,8	44,25	23,1	33,0	29,0	12,4	1,9	0,6	14,2	3,9
		30	32,9	374	26,9	47,87	15,8	29,4	36,1	15,5	2,4	0,8	14,1	4,2
		34	35,7	397	26,1	46,75	19,0	29,5	30,8	16,8	2,8	1,1	14,0	4,1
		38	29,7	356	27,8	47,07	16,1	28,8	34,4	17,3	2,3	1,0	15,0	3,5
		42	32,8	423	30,2	51,43	10,6	20,9	40,6	23,6	3,2	1,1	14,6	4,2
		46	21,1	329	25,8	45,63	24,2	32,9	28,4	11,5	2,2	0,6	13,3	3,9
	(-) Kalk, (-) Stmd.	28	17,1	317	23,4	44,94	25,8	40,6	27,2	4,7	1,2	0,5	12,8	4,3
		32	30,2	331	26,3	48,24	14,5	28,8	41,1	13,2	1,8	0,6	13,0	4,2
		36	35,3	316	29,7	50,05	11,2	23,3	40,3	21,1	2,9	1,2	12,9	4,2
		40	19,3	326	25,1	46,58	20,5	38,7	32,8	6,8	0,9	0,3	13,6	4,1
		44	20,9	301	26,6	47,97	17,0	34,0	36,8	10,3	1,5	0,4	13,6	4,7
		48	19,4	344	25,7	47,55	18,1	39,5	33,7	7,1	1,2	0,5	12,8	4,6

Tab. A17: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Kornertrag (dt ha<sup>-1</sup>, 86 % TS) von Winterweizen (langjährige Mittelwerte, 1968 - 2005)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	49,19	39,62
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	36,83	35,80
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	37,24	40,86
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	15,36	25,13

Tab. A18: Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitungstiefen auf den Kornertrag (dt ha<sup>-1</sup>, 86 % TS) von Hafer (langjährige Mittelwerte, 1969 - 2002)

Prüfglieder	Bodenbearbeitung	
	flach (17 cm)	tief (28 cm)
(+) Kalk, (+) Stallmistdüngung	27,13	27,13
(+) Kalk, (-) Stallmistdüngung	27,14	26,55
(-) Kalk, (+) Stallmistdüngung	27,77	26,60
(-) Kalk, (-) Stallmistdüngung	24,44	24,65

